



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학박사학위논문

수요관리를 통한 한국 제조업부문
고효율기기 전력소비 감축잠재량 분석
-전동기를 중심으로-

2014년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리전공

한 준

수요관리를 통한 한국 제조업부문 고효율기기 전력소비 감축잠재량 분석

-전동기를 중심으로-

지도교수 윤 순 진

이 논문을 도시계획학 박사학위논문으로 제출함
2013년 9월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리전공
한 준

한 준의 박사학위논문을 인준함
2013년 9월

위 원 장	<u>홍 중 호</u>	(인)
부 위 원 장	<u>허 은 녕</u>	(인)
위 원	<u>임 재 규</u>	(인)
위 원	<u>박 년 배</u>	(인)
위 원	<u>윤 순 진</u>	(인)

국 문 초 록

급격한 전력수요 증가로 인해 우리나라는 2011년 대규모 순환정전을 겪은 바 있고 2012년 말에는 전력 예비율이 3.8%까지 떨어지는 등 심각한 전력수급 불안정 상황에 있다. 이렇게 급증하는 전력수요를 감당하기 위해 우리나라는 공급 관리(Supply-Side Management) 중심의 에너지 정책을 펴왔으나, 원자력과 화력은 물론이고 재생가능에너지에서의 대규모 공급방식은 심각한 환경피해를 야기하고 수급 측면에서도 심각한 한계를 드러냈다.

그러나 에너지 서비스(Energy Service) 관점에서 보면 에너지의 절대량 확보 자체가 중요한 것이 아니라 에너지를 통해 얻을 수 있는 서비스가 중요하다. 에너지 서비스를 제공해 줄 수만 있다면 특정 에너지원을 고수할 필요도 없고, 에너지절대량을 확보해야 된다는 집착에서도 자유로워질 수 있다. 그래서 에너지 서비스를 제공할 수 있는 다양한 대안 모색이 가능할 수 있고, 특히 에너지 이용의 효율을 높이는 것이 상당히 중요한 대안 중 하나가 될 수 있다. 이런 측면에서 에너지 서비스는 공급관리 중심의 에너지 정책이 가진 한계를 극복하는 중요한 패러다임이라 할 수 있다.

우리나라 전력수요에서 제조업이 차지하는 비중은 50.2%(OECD 5위)이고, 이 중에서 42.9%를 차지하는 것이 전동기(electric motor)이다(2011년 기준). 이는 우리나라 전체 전력 수요의 21.7%에 해당하는 양으로서 전동기는 제조업에서 매우 중요한 대표적 에너지다소비 공통기술이다. 따라서 제조업부문에 서의 전동기를 효율적으로 이용하는 것은 우리나라 전력수요관리에 있어서 상당히 중요한 부분이다.

전동기의 효율 향상을 위해 우리나라는 2008년부터 전동기에 대한 최저소비효율제도(Minimum Energy Performance Standard; MEPS)를 시행하고 있다. 최저소비효율제이란 에너지를 이용하는 기기에 대해 정부차원에서 효율기준의 하한선을 정해놓고 생산자로 하여금 그 이상의 효율을 가진 제품만을 생산, 판매하도록 하는 제도이다. 우리나라의 전동기 최저소비효율기준은 EU 및 미국과 비슷한 수준으로 고효율 전동기 확산에 많은 기여를 할 것으로 보

인다.

그러나 우리나라의 산업용 전기요금은 OECD 국가 중에서 가장 낮고 화석 연료보다 싼 ‘요금의 역전현상’이 발생하고 있어서 에너지 수요가 전기로 계속 집중되고 있다. 그리고 미국이나 EU가 최저소비효율제도를 거의 모든 전동기에 대해 적용하는데 반해, 우리나라는 삼상유도 전동기 200kW 이하에만 적용하고 있어서 대용량 전동기에 대한 효율 개선은 담보하기 어렵다. 게다가 필요 이상으로 큰 용량의 전동기를 선택하는 관행(oversizing)으로 인해 전동기 부하율이 낮아져 전동기 효율도 낮아지는 문제가 있으며, 전동기 속도 조절을 통해 전력 소비를 줄이는 인버터도 아직까지 선진국에 비해 설치율이 낮다. 이런 점에서 볼 때 우리나라 제조업 전동기 전력수요는 추가적인 감축 가능성이 있다고 판단된다.

본 논문에서는 우리나라 제조업 전동기를 대상으로 상향식 최적화 에너지 시스템 모형인 MESSAGE 모형을 이용하여 최저소비효율제도 시행 이외에 추가적인 감축방안을 도입할 때의 전력 감축잠재량과 경제성을 시나리오를 설정하여 분석하였다. 감축방안으로는 OECD 수준으로의 산업용 전기요금 인상과 대용량 전동기에 대한 최저소비효율제 확대, 전동기 부하율 개선, 인버터 설치를 고려하였으며, 전기요금 인상의 경우 세 가지 수준의 가격탄력성을 적용하여 수요감소 효과를 분석하였다. 아울러 비교 차원에서 해외의 최적가용기술(Best Available Technology; BAT) 도입에 대해서도 감축잠재량과 경제성을 분석하였다.

분석 결과, 전력수요 감축잠재량은 단일방안으로는 전기요금 인상이 가장 효과가 커서 2030년까지 BAU 대비 7.5% 전력을 감축할 수 있는 것으로 나왔고, 모든 감축수단을 다 적용했을 경우 2030년까지 BAU 대비 9.8%를 줄일 수 있는 것으로 나왔다(전력 가격탄력성 -0.460 적용). 한편, 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율제도 확대는 절감 효과가 매우 작았다. 단위절감비용의 경우, 전동기 부하율 개선은 -108.7원/kWh로 가장 편익이 크게 나왔고, 전기요금 인상도 -83.7~-88.3원/kWh 수준으로 편익이 크게 나왔다. 비용이 (-)으로 나온 것은 전동기에서 전기 비용이 전체 비용에서 차지하는 비중이 높아 전력 절감이 바로 비용 절감으로 이어지기 때문이다. 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율제도 확대는 32.7원/kWh로 가장 비싼 대안으로 나왔

는데, 그래도 이는 산업용 전기요금 전망치보다는 작으므로 대안으로서의 가능성이 아주 없지는 않다.

이를 통해 얻은 정책적 함의는 다음과 같다. 첫째, 산업용 전기요금 인상은 다른 어떤 대안보다 전력 감축잠재량이 크고 그에 따른 전력비용 절감도 크기 때문에 전력 수요관리를 위해서는 전기요금 인상이 무엇보다 필요하다. 둘째, 전동기의 전력 수요관리는 시행으로 인한 편익이 크기 때문에 이에 대한 적극적인 홍보와 투자가 이루어져야 한다. 셋째, 전동기의 최저소비효율제도는 전동기 효율 향상을 통해 상당한 전력 수요를 줄일 수 있다는 점에서 바람직하며 지속적으로 시행해 갈 필요가 있다.

주요어 : 에너지 서비스, 전동기, 수요관리, MESSAGE 모형, 효율,
최저소비효율제도, 산업용 전기요금, 인버터, 부하율, BAT

학 번 : 2008 - 31075

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 방법 및 범위	4
3. 연구 흐름도	6
II. 이론적 배경 및 선행연구	8
1. 에너지 서비스와 효율	8
2. 전동기 효율 향상을 통한 전력 감축잠재량	11
1) 수요관리의 중요성과 잠재량	11
2) 전동기 전력 감축 잠재량 연구	13
3. 전력 수요 추정 및 가격탄력성	17
1) 구조 모형 접근	17
2) 비구조 모형 접근	20
III. 제조업 전동기 전력수요와 전동기 효율향상 정책	29
1. 제조업 부문의 전동기 전력 수요	29
1) 제조업 부문의 전력 수요	29
2) 제조업에서의 전동기 전력 수요	34
3) 제조업 업종별 전동기 전력사용량 변화 요인	39
2. 전동기 최저소비효율제도	44
1) 해외의 전동기 최저소비효율제도	44
2) 우리나라의 전동기 최저소비효율제도	51
3) 국내 전동기 관련 실태 조사와 자료구축 현황	57
3. 전동기의 부하율과 인버터	59
1) 전동기의 부하율	59
2) 인버터	62
4. 산업부문 전기 요금	66

IV. MESSAGE 모형과 입력자료	71
1. MESSAGE 모형	71
1) 개요	71
2) 분석원리	73
2. 주요 전제 및 입력자료	77
3) 전동기 동력서비스 수요 추정	80
4) 최적가용기술 및 고효율 전동기 특성자료	89
5) 전동기 과거 보급용량 추정	94
6) 부하율 적용	95
7) 인버터의 특성 자료	96
3. Scenarios	98
V. 분석 결과	101
1. MESSAGE 모형 분석 결과	101
1) 시나리오별 전력소비량 전망	101
2) 시나리오별 전동기 평균 효율	108
3) 시나리오별 전력소비 감축량 및 비용	111
2. 신기술 전동기의 초기투자비 회수 기간 분석	120
VI. 결론	122
1. 요약 및 결론	122
2. 연구의 의의와 정책적 함의	124
3. 연구의 한계 및 향후 개선방향	126
참고문헌	127
부록	140

표 차례

<표 1> 우리나라 산업 및 제조업 부문 전력 수요의 가격 탄력성 연구	25
<표 2> 주요 55개국의 부문별 전동기 전력수요량	35
<표 3> 전기 소비에서 업종별 연도별 전동기 비중	39
<표 4> 미국 최저소비효율제도에서의 전동기 유형·용량별 효율 기준	46
<표 5> EPA의 전동기의 전부하 효율기준 (NEMA MG-1 Table 12-11)	47
<표 6> NEMA Premium(60Hz) 전동기의 전부하 효율 기준	48
<표 7> EU의 전동기 최저소비효율 기준 도입시기와 대상 및 기준	49
<표 8> EU의 전동기 명목 효율 기준(50Hz)	50
<표 9> 우리나라 삼상유도 전동기의 최저소비효율기준 적용시기	52
<표 10> 우리나라 삼상유도 전동기의 최저소비효율기준	53
<표 11> 우리나라 삼상유도 전동기의 프리미엄 효율기준	55
<표 12> 미국과 EU의 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율기준	57
<표 13> 국내 전동기 관련 실태조사의 조사항목	58
<표 14> 전동기 크기 선택 시 고려하는 기준에 대한 응답 결과	61
<표 15> 인버터의 효율 개선 효과	63
<표 16> 국내 고효율 인버터 지원금	65
<표 17> MESSAGE 분석 공식	74
<표 18> MESSAGE 모형에서의 균등화 비용 공식	75
<표 19> GDP 성장률 전망치(KDI)	85
<표 20> 제조업 업종별 경상부가가치 비중 전망	85
<표 21> 제조업 업종별 전동기 전력소비 비중	86
<표 22> 삼상유도 전동기의 고효율 기술 특성자료	93
<표 23> 부하율에 따른 효율 저하율 (부하율 75% 기준)	96
<표 24> 인버터의 효율개선 효과 및 수명, 비용	97
<표 25> 시나리오 구분	100
<표 26> 시나리오별 제조업 전동기의 2010-2030년 누적 전력사용량과 누적비용	113
<표 27> 시나리오별 BAU 대비 전력사용량·비용 증감 및 단위절감비용	115
<표 28> 고효율 전동기의 초기구입비용 증가분 회수기간	121

<표 29> 우리나라 IE2 전동기의 평균 효율	141
<표 30> 우리나라 IE3 전동기의 평균 효율	142
<표 31> 우리나라 IE2 전동기의 평균 비용	143
<표 32> 우리나라 IE3 전동기의 평균 비용	144

그림 차례

<그림 1> 연구 흐름도	7
<그림 2> OECD 국가 전력소비에서 산업 비중 (2010년 기준)	30
<그림 3> OECD 국가 산업부문 전력소비 증가율 (1973-2010년)	31
<그림 4> 우리나라 연도별 업종별 전기소비량	32
<그림 5> 제조업 설비용 에너지원 비중 및 사용량 추이	33
<그림 6> 우리나라 부문별 주요 전력량	37
<그림 7> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (1992~2010년)	41
<그림 8> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (1992~2001년)	42
<그림 9> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (2001~2010년)	43
<그림 10> 효율등급별 전동기 용량에 따른 효율 곡선	45
<그림 11> 한국, 미국, EU의 용량별 최저소비효율제 기준	56
<그림 12> 전동기 부하율과 효율과의 관계	59
<그림 13> 전동기 용량별 부하율과 효율과의 관계	60
<그림 14> 우리나라 고효율 인버터 지원금 추이와 절감전력량 추이	64
<그림 15> OECD 국가 명목 산업용 전기요금 (2009년 기준, 구매력지수 미고려)	67
<그림 16> OECD 국가 명목 산업용 전기요금 (2009년 기준, 구매력지수 고려)	67
<그림 17> 주요국의 산업용 경유·천연가스 요금 대비 산업용 전기 요금의 비율	68
<그림 18> 우리나라 용도별 전기요금의 실질요금 변화 추이	70
<그림 19> 제6차 전력수급기본계획에서의 명목·실질 산업용 전력요금 전망	78
<그림 20> 산업용 전기요금 인상 시나리오	80
<그림 21> 전동기 동력서비스 추정 단계	81
<그림 22> 우리나라 산업/제조업 전력수요의 가격탄력성 추정치	83

<그림 23> 제조업부문 전력수요 전망	84
<그림 24> 제조업 전동기 동력서비스 수요 전망	87
<그림 25> IMSSA 캡처 화면 1	91
<그림 26> IMSSA 캡처 화면 2	92
<그림 27> 우리나라 제조업 전동기 연도별 보급용량 추정치 (1995-2010)	95
<그림 28> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.66 적용)	102
<그림 29> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	103
<그림 30> B계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	103
<그림 31> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.460 적용)	104
<그림 32> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	105
<그림 33> B계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	105
<그림 34> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.045 적용)	106
<그림 35> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	107
<그림 36> B계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망	107
<그림 37> 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율 전망	109
<그림 38> M계열 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율	110
<그림 39> B계열 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율	110
<그림 40> 시나리오별 제조업 전동기 2010-2030년 누적 전력사용량 및 누적비용	114
<그림 41> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 전력감축량	118
<그림 42> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 비용증가분	119
<그림 43> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 단위절감비용	119

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2011년 우리나라 전기소비량은 총 455 TWh로 중국, 미국, 일본, 러시아, 인도, 독일, 캐나다에 이어 세계 8위 규모였고,¹⁾ 1973~2010년 사이 전력수요 연평균 증가율은 10.1%, 2001~2010년 사이 증가율은 6.1%로 각각 OECD 국가 중 최고였다(IEA, 2012). 또한 2002~2011년 사이 우리나라 전력의 연평균 증가율은 6.0%로 다른 최종에너지 소비 증가율 2.7%를 크게 상회하고 있다.²⁾ 이처럼 우리나라는 전력 소비의 규모나 증가속도에 있어 상당히 크고 빠르고 늘고 있다.

이렇게 늘어나는 전력 소비를 감당하기 위해 우리나라는 그동안 공급 관리(Supply-Side Management) 중심의 에너지 정책을 펴왔다. 2013년 현재 우리나라에는 23기의 원자로가 가동 중에 있고, 5기가 건설 중에 있으며, 6기에 대한 건설계획도 완료되어 2024년까지 총 11기가 추가 건설될 예정이다. 제6차 전력수급기본계획에 따르면 석탄과 LNG 발전도 2027년까지 15.3GW가 더 늘어날 계획이다(지식경제부, 2013). 재생가능에너지도 단기간에 공급량을 늘리기 위해 2002년부터 실시해오던 발전차액보전제도(Feed-in-Tariff, FIT)가 2012년 폐지되고 신재생에너지의무할당제(Renewable Portfolio Standard, RPS)로 전환되었다.

이러한 공급 확대에도 불구하고 한국의 전력 수급 상황은 점차 심각해졌는데, 공급능력 기준 전력 예비율은 2003년 17.1%에서 2012년 3.8%까지 떨어졌고 급기야 2011년에는 대규모 순환정전까지 겪었다.³⁾ 뿐만 아니라 1991년 이

1) Central Intelligence Agency 홈페이지에 있는 the world factbook 2012 자료를 인용함. (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>)

2) 에너지경제연구원 국가에너지통계종합정보시스템 (<http://www.kses.net>)

3) 최근 10년간 우리나라 전력의 공급 예비율(%)의 연도별 추이를 살펴보면 약간의 부침이 있지만 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 구체적으로 2003년 17.1%, 2004년 12.2%, 2005년 11.3%, 2006년 10.5%, 2007년 7.2%, 2008년 9.1%,

후에는 장기전력수급계획을 통해, 2002년 이후에는 전력수급기본계획을 통해 매 2년마다 약 15년 정도의 계획기간에 대해 전력 수요 예측을 하고 있는데, 그동안 실제 전력사용량은 이 전력수요 예측치를 10% 내외로 상회하여 왔다.

이처럼 아무리 공급을 늘려가더라도 기하급수적으로 늘어나는 전력 수요를 감당하는 것은 가능하지도 않으며, 여러 많은 부작용들을 수반하게 된다. 원자력은 경제성, 환경친화성, 사회적 형평성, 민주적 절차성 등에서 계속 문제가 제기되어 왔고(윤순진, 2003), 화력발전은 화석연료 고갈이나 온실가스, 대기오염물질 배출에서 큰 한계가 있다. 재생가능에너지는 큰 잠재량에도 불구하고, 아직 경제성이나 기술개발 측면에서 시간과 노력이 더 필요하고, 수소 에너지나 연료전지와 같은 신에너지도 비용이나 기술 개발 측면에서 갈 길이 멀다. 그런데 사실 인간이 실제 필요로 하는 것은 에너지 자체가 아니라 그것이 가져다주는 에너지 서비스(Energy Service)이다. 에너지 서비스 관점에서 보면 에너지 서비스를 얻을 수 있는 다양한 대안 모색이 가능할 수 있고, 그 중에서 에너지 효율 향상이나 절약이 공급관리가 가진 한계를 극복하는 중요한 대안이 될 수 있다.

우리나라 전력수요에서 산업부문이 차지하는 비중은 2011년 기준 53.2%(제조업 50.2%)(지식경제부·에너지경제연구원, 2013)이며 OECD 국가들 중에서 다섯 번째로 크다(IEA, 2012).⁴⁾ 또한 제조업에서 사용하는 에너지 중 전기가 차지하는 비중은 1980년 51%에서 2010년 78%로 증가해 우리나라의 전력화(electrification) 현상도 더욱 심화되었다.⁵⁾ 이렇게 우리나라 제조업의 전력 소비량이 상당하고, 그 중에서 전동기(Motor)가 차지하는 비중은 42.9%로(지식경제부, 2012b), 이는 우리나라 전체 전력 수요의 20.9%를 차지하는 상당한 양이다(2010년 기준). 따라서 제조업 부문에서 전동기를 효율적으로 이용하는 것은 우리나라 전력수요관리에 있어서 상당히 중요하다.

전동기의 효율 향상을 위해 미국, EU, 캐나다, 호주, 중국 등에서는 전동기에 대한 최저소비효율제도(Minimum Energy Performance Standard; MEPS)

2009년 7.9%, 2010년 6.2%, 2011년 5.5%, 2012년 3.8%였다(출처: 전력통계정보시스템 <http://epsis.kpx.or.kr>).

4) 우리나라는 아이슬란드, 칠레, 멕시코, 룩셈부르크 다음으로 산업부문의 전력 수요 비중이 높다.

5) 에너지경제연구원 국가에너지통계종합정보시스템 (<http://www.kesis.net>)

를 시행하고 있다. 우리나라도 2008년부터 200kW 이하 삼상유도 전동기를 대상으로 이를 시행하기 시작했다. 우리나라 전동기 최저소비효율기준은 EU 및 미국과 비슷한 수준으로 전동기의 효율적 이용에 많은 기여를 할 것으로 보인다. 그러나 우리나라의 산업용 전기요금은 OECD 국가 중에서 가장 낮고 화석연료보다 싼 ‘요금의 역전현상’이 발생하고 있어서 에너지 수요가 전기로 계속 집중되고 있다. 그리고 미국이나 EU가 최저소비효율제도를 거의 모든 전동기에 대해 적용하는 데 반해, 우리나라는 삼상유도 전동기 200kW 이하에만 적용하고 있어서 대용량 전동기에 대한 효율 개선은 담보하기 어려운 실정이다. 게다가 필요 이상으로 큰 용량의 전동기를 선택하는 관행(oversizing)으로 인해 전동기 부하율이 낮아져 전동기 효율도 낮아지는 문제가 있으며, 전동기 속도 조절을 통해 전력 소비를 줄이는 인버터도 아직까지 선진국에 비해 설치율이 낮다. 이런 점에서 볼 때 우리나라 제조업 전동기 전력수요는 추가적인 감축 가능성이 있을 것이다.

이에 이 논문에서는 우리나라 제조업 전동기를 대상으로 전력 수요관리가 중요하다는 인식 하에 최저소비효율제도 시행과 함께 추가적인 감축방안을 도입할 때의 전력 감축잠재량과 경제성을 시나리오 분석을 통해 추정하고자 한다. 감축방안으로는 산업용 전기요금 인상과 최저소비효율제 확대, 전동기 부하율 개선, 인버터 설치를 고려하였으며, 이들 방안들은 모두 전동기 전력수요를 줄이는 데 있어 중요한 이슈로서 논의되고 있는 사항들이다. 국내에서는 아직까지 전동기 최저소비효율제도와 추가적인 감축 방안을 통한 전력소비 감축잠재량 분석이나 경제성 분석에 관한 연구가 제대로 이루어지지 않았기 때문이다. 이 논문에서는 이 연구는 학술적 정책적 의의를 지니며, 향후 관련 정책 수립이나 보완 방향에도 기여할 수 있을 것이다.

2. 연구의 방법 및 범위

이 논문에서는 우리나라 제조업부문 전동기를 대상으로 MESSAGE 모형을 이용해 전력사용량과 비용에 관한 시나리오 분석을 하였다. MESSAGE(Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impact) 모형은 상향식 최적화 에너지 시스템 분석 모형으로 에너지를 이용하는 기술에 대한 상세한 자료를 바탕으로 선형계획법(Linear Programming)을 이용해 환경적·정책적·기술적 제약 하에서 가장 비용효과적인 에너지 공급방안을 분석하는 모형이다. 이 논문에서는 최저소비효율제도 이외에 전동기의 전력소비를 줄일 수 있는 여러 감축방안을 각각 시나리오로 구성한 뒤, MESSAGE 모형을 활용해 시나리오별로 비용효과적인 전동기 기술믹스를 찾고 전력 사용량과 소요 비용을 추정하였다.

시나리오는 현재 시행되고 있는 최저소비효율제도를 BAU 시나리오로 두고, 산업용 전기요금 인상과 최저소비효율제 적용용량 확대, 전동기 부하율 개선, 인버터 설치 그리고 이들 중 몇 개를 병행하는 경우를 각각 대안 시나리오로 두었다. 아울러 최적가용기술(Best Available Technology; BAT)을 도입하여 감축방안을 병행할 경우도 가정하여 시나리오로 두었다. 전기요금 인상 시나리오는 우리나라 산업용 전기요금이 OECD 수준만큼 증가한다고 가정하였고, 부하율 향상 시나리오는 현재 산업용 전동기 평균 부하율이 10% 증가하는 것으로 가정하였다. 이를 통해 우리나라 제조업 전동기 분야에서 가장 비용효과적인 전력소비 감축방안과 최대 전력 감축잠재량 수준을 파악하는데 함의를 얻을 수 있을 것이다.

MESSAGE 모형 분석에 필요한 전동기의 동력서비스 전망치는 선행연구에서 추정한 산업용 전력 수요함수를 활용하여 도출하였으며, 전기요금 인상에 의한 전동기 수요 변화는 산업용 전기의 가격탄력성에 관한 선행연구 중에서 대표적인 수치들을 활용해 추정하였다. 기본적인 전력수요함수는 차경수 외(2008)의 전력수요함수를 활용하였으며, 전력의 가격탄력성은 차경수 외(2008)의 0.045 이외에 정한경·박광수(2010)의 0.460, 김수덕(2009)의 0.66을 추가적으로 활용하였다.

이 논문에서 다룬 전동기는 제조업에서 사용되고 있는 삼상유도 전동기, 단상유도전동기, 고효율 전동기, 직류전동기, 기타 전동기를 대상으로 하였고, 가장 많이 쓰이는 삼상유도 전동기에 대해서는 7개 용량구간으로 세부 구분하였다. 그리고 해외 전동기의 BAT 전동기와 국내 IE2(고효율 전동기), IE3(프리미엄 전동기)도 포함했다.

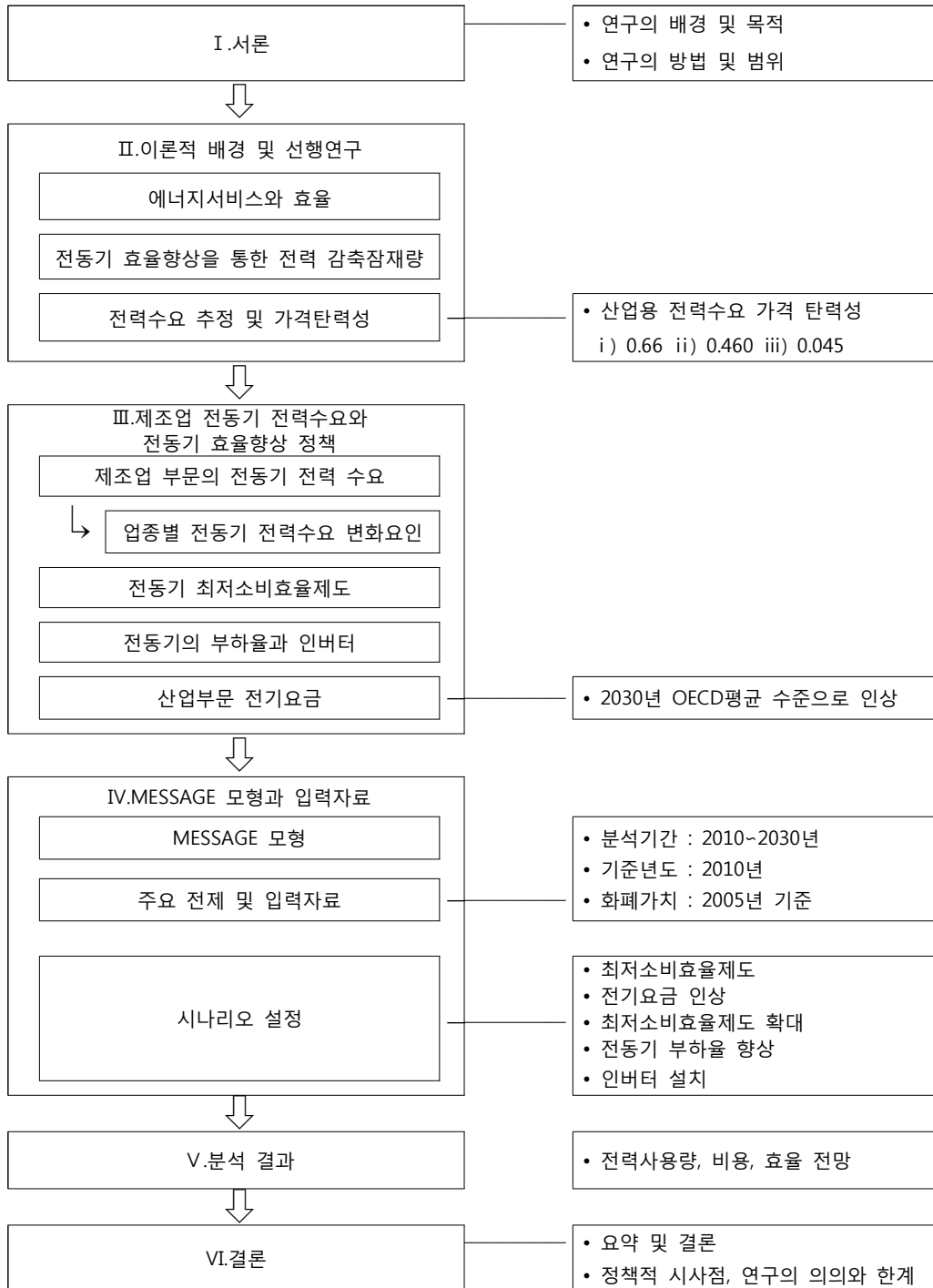
전동기에 대한 기술 특성 데이터는 에너지관리공단(2009)을 활용하였으며, 전동기 BAT는 International Motor Selection and Saving Analysis(IMSSA) 자료를 활용하여 종류별 용량별 평균을 도출하여 DB로 활용하였다. 아울러 국내 에너지관리공단에 IE2, IE3로 등록된 전동기의 평균 효율과 평균 유통물가 자료를 바탕으로 우리나라 고효율 전동기에 대한 기술데이터 DB를 추가하였다. 전동기의 부하율에 따른 효율 저하율은 IMSSA 데이터로부터 용량별로 평균치를 도출하여 이용하였고, 인버터의 전력절감효과는 UNIDO(2010)를 활용하였다.

우리나라 전동기의 과거 용량 데이터는 최근 년도의 데이터 부재로 인해 불가피하게 에너지관리공단의 2004년 자료와 지식경제부의 2008년 자료를 바탕으로 부가가치 대비 로그함수를 활용해서 2010년까지 외삽하였다. 여기에 전동기 용량과 부하율, 가동률, 효율을 적용해 우리나라 전체 전동기 전력사용량을 추정하였고, 통계적 일치를 위해 우리나라 총 전력사용량과 전동기 전력사용량 비중을 이용해 하향식으로 도출한 전동기 전력사용량에 맞게 조정하였다.

이 논문의 분석 기준년도는 2010년이고, 분석기간은 2030년까지로 하였으며, 화폐가치는 2005년도 실질 가치로 나타내었고, 할인율은 5.0%를 적용하였다.

3. 연구 흐름도

이 연구의 흐름은 다음과 같다. I 장에서는 연구의 배경과 목적, 연구의 방법과 범위에 대해 기술하였다. II 장에서는 연구의 이론적 배경으로서 에너지 서비스 개념과 효율의 중요성, 전력 수요함수 추정 방법론과 전력수요의 가격 탄력성에 대해 기술하였다. III 장에서는 업종별 전동기 전력소비량 요인분해 결과를 비롯해 전동기에서 중요한 영역인 최저소비효율제도와 부하율, 인버터, 전기요금에 대해 다루었다. IV 장에서는 MESSAGE 모형에 대한 소개와 주요 입력자료 및 시나리오에 대해 기술하였다. V 장에서는 주요 분석결과를 제시하였으며, 이를 바탕으로 VI 장에서는 정책적 함의와 논문의 의의 및 한계에 대해 기술하였다. 이를 도식도로 나타내면 다음 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 연구 흐름도

II. 이론적 배경 및 선행연구

1. 에너지 서비스와 효율

현재 인류가 사용하는 에너지 수요가 상당히 많기 때문에 에너지 자체가 매우 중요할 것 같지만, 실제 필요한 것은 에너지 자체가 아닌 에너지를 소비함으로써 얻을 수 있는 동력이나 이동, 열 같은 서비스이다(Masters, 2004). 이렇게 인간의 후생을 목적으로 에너지 매체(Energy carrier)를 통해 생산하는 편익(Haas et al., 2008; Modi et al., 2005) 혹은 최종소비자가 에너지를 이용함으로써 제공받는 서비스의 양(Gouveia et al., 2012)을 에너지 서비스라 한다.⁶⁾

에너지 서비스 개념이 중요한 까닭은 에너지 서비스 개념을 통해 에너지 정책의 근본적인 방향이나 정책 옵션의 범위가 달라질 수 있기 때문이다. 에너지 서비스 개념을 고려하지 않은 기존 에너지 정책에서는 일정량 이상의 에너지 확보나 에너지 기술 개발에 초점을 맞추면서(Savacool, 2011) 에너지 수요를 충족시킬 수 있는 에너지 가용자원이나 기술의 폭을 매우 좁게 보았고 대안적인 에너지 경로에 대한 모색도 많지 않았다(Gouveia et al., 2012). 그러나 에너지 정책의 초점을 에너지 서비스에 두게 된다면 이를 위한 정책 옵션도 매우 다양해질 수 있다. 즉, 에너지 서비스를 얻을 수 있는 수단에 대한 다양한 정책들이 개발될 수 있고, 환경적으로도 건전하고 보다 효율적인 정책들에 대한 대안들이 나올 수 있다.

에너지서비스의 양을 추정하는 방법으로 단순히 설문조사를 통해 에너지 비용과 관계없이 에너지 서비스에 일정한 금전적 가치를 부여하게 할 수 있다. 혹은 에너지 서비스를 에너지 단위로 표현하여 최종에너지(final energy or end-use energy)와의 일정한 관계식으로 나타낼 수도 있는데, 두 변수 간

6) 연구에 따라 에너지를 직접 에너지 서비스와 간접 서비스로 구분하기도 하는데, 조명, 난방, 냉방, 조리, 동력, 수송과 같은 것들을 직접 에너지 서비스라 하고, 이를 얻기 위해 이용하는 전구, 보일러, 에어컨, 음식, 자동차 같은 에너지 전환 기술을 간접 에너지 서비스라 한다(Haas et al., 2008). 혹은 직접 에너지서비스만을 에너지서비스로 보기도 한다(Gouveia et al., 2012).

의 관계에서 에너지 기기의 효율을 이용할 수 있다(Pedrasa et al., 2011; UNDP, 2000; Wirl, 1995). 마찬가지로 방식으로 에너지 서비스의 대리변수로서 유효에너지(useful energy) 개념을 사용할 수도 있는데(Pachauri et al., 2004; Reister and Devine, 1981), 유효에너지란 최종에너지 중에서 실제로 소비자에게 전달되어 편익을 만들어 내는 에너지를 말한다.⁷⁾ 이때 유효에너지는 대개 최종에너지와 에너지 기기의 효율을 곱해 추정한다(Gouveia et al., 2012). 즉, 에너지 서비스는 최종에너지에 에너지 기기의 효율을 곱한 개념으로 볼 수 있다.

이처럼 에너지 서비스 개념에는 에너지 효율 개념이 포함되기 때문에 에너지 정책에서 효율이 중요한 요소가 된다. 최종에너지 자체가 아닌 에너지 서비스가 초점이기 때문에 효율이 높으면 높을수록 최종에너지를 그만큼 덜 확보해도 되기 때문이다. 반면 최종에너지 자체에 초점을 두게 되면 효율에 상관없이 특정한 최종에너지의 절대적인 양을 확보하는 것으로만 정책 선택지가 좁아지게 된다.

한편 효율 개선을 하게 되면 초기 비용이 일부 소요되더라도 오랜 기간 에너지 소비를 줄일 수 있어서 결과적으로 에너지 절감에 의한 이득을 볼 가능성이 높다. 그래서 합리적인 판단을 한다면 에너지 효율개선을 하는 것이 바람직한 선택이다. 그러나 실제 현실에서는 그러지 않게 되는 상황이 많이 발생하는데, 이처럼 에너지효율 개선이 더 이득이 됨에도 여러 가지 이유로 인해 그렇게 행동하지 않는 상황을 에너지 효율 패러독스(Energy Efficiency Paradox)라고 한다(Decanio, 1998; Jaffe and Stavins, 1994). 그리고 가장 비용 효율적인 에너지 효율 수준과 실제 실행되고 있는 에너지 효율과의 차이를 에너지 효율 격차(Energy Efficiency Gap)라고 한다(Backlund et al., 2012).

산업부문에서 나타나는 에너지 효율 패러독스 현상에 관해 그동안 많은 연구들은 있었는데(Anderson and Newell, 2004; DeCanio, 1993, 1998; De Groot et al., 2001; Jaffe and Stavins, 1994), 대체로 그 원인을 정보 부족이나(Sola et al., 2011) 에너지에 낮은 우선순위를 부여하기 때문으로 보았다(Groot et al., 2001; McKane et al.(2007). 혹은 에너지 효율 투자가 비가역적이기 때문이거나(Hassett and Metcalf, 1993, 1995; van Soest and Bulte, 2000) 미래 에

7) 두산백과사전

너지 비용의 불확실성 때문에 소비자들이 고효율기기의 초기 투자비용에 더 많은 가중치를 두기 때문으로 보기도 했다(Sutherland, 1991). 혹은 합리적 소비자라면 절대 더 큰 이익을 무시할 까닭이 없다는 점에서 에너지 효율 격차가 아예 없다고 부정하기도 했다(Sutherland, 1996).

한편, 전동기에 대한 에너지 효율 패러독스와 관련해 통상산업부(1997)와 이성근(2003), 지식경제부(2008a), IEA(2011)는 전동기를 구입하여 펌프, 압축기, 팬 등의 장비를 생산하는 1차 소비자(Original Equipment Manufacturers, OEMs)들은 제품의 효율보다는 가격을 더 중요시 하기 때문에 고효율 전동기보다는 일반 전동기나 저렴한 수입 전동기를 선호하며, 제품 성능에는 관심을 가지나 효율에는 관심을 갖지 않는다고 했다. 그래서 아무리 고효율 전동기가 개발되더라도 소비자들이 저렴한 기기를 찾기 때문에 1차 소비자들은 이에 부응하여 고효율전동기 사용을 피한다. 특히 지식경제부(2008a)는 산업체에 대한 조사결과를 인용해 125HP 이상의 대형 전동기는 대개 최종사용자에게 구매되기 때문에 효율이 높은 반면, 125HP 이하 전동기들은 효율보다는 가격이나 크기, 무게를 더 중요시하는 1차 수요자에게 구매되므로 효율이 낮을 수 있다고 했다.

한편, 경제학에서는 에너지 효율 격차가 발생하는 것에 대해 여러 가지 차원의 설명을 했었다. 소비자가 고효율기기에 대해 부여하는 할인율이 시장 할인율보다 높다고 설명하기도 했고(Hausman, 1979), 실증연구를 통해 내재된 할인율이 25%에서 100%이상 될 수도 있다는 것을 발견하기도 했다(Sanstad et al, 2006; Train,1985). 혹은 미래 에너지 비용의 불확실성 때문에 소비자가 고효율기기 초기 투자비용에 큰 가중치를 둘 수도 있고(Sutherland, 1991), 에너지효율투자가 비가역적이기 때문이거나(Hassett and Metcalf, 1993, 1995; van Soest and Bulte, 2000), 미래 에너지가격에 대해 소비자가 부정확한 대리변수를 쓰기 때문으로 설명하기도 했다(Jaffe et al., 2004). 또는 연구자가 알지 못하는 고효율기기 구매에 관련된 숨겨진 비용(hidden cost)이 있을 수 있고(Jaffe et al., 2004), 효율개선의 효과를 과대추정했을 수도 있으며(Hausman and Joskow, 1982), 합리적으로 최적화를 하는 소비자가 더 큰 이익을 무시할 리 없다는 점에서 아예 에너지 효율 격차라는 것이 없다고 주장하기도 했다(Sutherland, 1996).

2. 전동기 효율 향상을 통한 전력 감축잠재량

1) 수요관리의 중요성과 잠재량

전기 같은 에너지에 대한 수급 관리는 크게 공급관리와 수요관리로 구분할 수 있는데, 공급관리(Supply-Side Management, SSM)는 에너지수요 증가로 인한 공급부족을 에너지 공급을 늘림으로써 해결하는 것이고(박수익, 2007), 수요관리(Demand-Side Management, DSM)는 에너지공급설비를 늘리는 대신 에너지 사용을 합리화함으로써 에너지 부족분을 해결하는 것이다(박수익, 2007).⁸⁾ 에너지 사용을 합리화한다는 것은 부하를 분산시키거나 효율을 향상 시킴으로써 에너지이용방식의 개선을 통해 불필요하게 소비되던 에너지를 줄이는 것이라 할 수 있다.

그동안 대부분의 국가에서는 에너지가 경제성장에 필수이기 때문에 에너지 소비는 계속 늘어날 수밖에 없을 것이라 전제하였고(진상현, 2008) 그래서 값싸고 풍부한에너지의 안정적 공급에 정책의 초점을 맞춰왔다(윤순진, 2002). 그러나 에너지 공급 중심의 전략은 많은 문제와 한계를 보여주게 되었다. 원자력의 경우, 2011년 일본 후쿠시마 원전사고나 연이은 국내 원전 고장 사고에서처럼 안정성 문제가 끊이질 않고, 사용후 핵연료의 안전한 관리기술이 아직 개발되지 않은 데다 방사성 폐기물 처리장 선정을 둘러싼 지역 갈등도 있으며, 일본 발전단가 검증위원회 자료(Matsuo, 2012)와 MIT 보고서(MIT, 2009)에서 지적했듯이 ‘숨겨진 비용(hidden cost)’으로 인한 비경제성이 있어서 환경친화성과 안정성, 사회적 형평성, 경제성 측면에서 문제가 심각하다. 화력발전은 화석연료 고갈 가능성이 높고, 온실가스나 대기오염물질 배출에서 큰 한계가 있다. 재생가능에너지 또한 큰 잠재량에도 불구하고 기술개발이나

8) 우리나라에서는 1980년 6월부터 ‘에너지이용합리화법’을 시행하고 그동안 수차례의 개정을 해오면서 우리나라 “에너지이용의 합리화”를 진행하였다. 동 법에서 “에너지이용의 합리화”의 정확한 의미에 대해서는 분명히 정의하고 있지는 않으나 대략적인 의미로 에너지의 절약이나 효율개선 등을 통해 에너지를 효율적으로 이용함으로써 에너지 수급안정과 온실가스 배출 저감 등의 환경피해를 줄이는 것으로 이해할 수 있다.

가격경쟁력 확보, 전기저장시설 개발 등에 시간이 더 걸릴 것으로 보인다. 수소, 연료전지, 석탄액화 및 가스화 같은 신에너지도 기술개발이나 가격 측면에서 아직 역할을 하기에는 이르며 재생가능성을 충족하기 어렵다. 이런 상황으로 인해 공급관리를 통해 기하급수적으로 늘어나는 에너지 수요를 감당하는 것에 대한 회의적 시각이 점차 커졌고 그에 따라 수요관리의 중요성도 점차 커져 왔다.

이런 맥락에서 장현준(2001)은 “공급중심에서 수요관리중심으로의 정책 전환”의 필요성을 주장하였고, 윤순진(2002)도 지속가능한 에너지체제를 위해 Lovins(1976)가 제시했던 것처럼 공급위주의 경성에너지 경로(hard energy path)에서 수요를 줄이고 재생가능에너지가 중심이 되는 연성에너지경로(soft energy path)로의 전환이 필요하다고 하였다. 뿐만 아니라, 정부 차원에서도 매년 발표되는 전력수급기본계획에서 수요관리의 중요성을 강조하고 수요관리 목표도 제시해 왔으며, 6차 전력수급기본계획에서는 수요관리를 첫 번째 핵심목표로 삼았다.

한편, Lovins(1990)는 일찍이 Negawatt 개념을 통해 수요관리에 의해 상당한 에너지를 절감할 수 있음을 주장하였다. 그리고 에너지 절약이나 부하관리를 위한 특정 기술, 기기 또는 수요관리 방안을 통해 절감될 수 있는 에너지 및 설비 규모가 수요관리 잠재량이다(산업자원부, 1998). 수요관리 잠재량 혹은 에너지 감축 잠재량은 몇 가지로 구분할 수 있는데, 이론적 잠재량, 최대 기술적 잠재량, 단계별 기술적 잠재량, 경제적 잠재량, 도달 가능 잠재량, 정책적으로 달성 가능한 잠재량 등이 있다(산업자원부, 1998; 이성인·최도영, 2010; EPRI, 1993; UNDP, 2000). 먼저 이론적 잠재량(Theoretical potential)은 열역학적으로 에너지 손실을 최소화 시킨 상태에서 얻을 수 있는 이론적으로 최대 달성 가능한 에너지 감축 잠재량이다. 최대 기술적 잠재량(Maximum Technical potential or Instantaneous Technical potential)은 기존 설비를 남은 수명에 관계없이 비용을 고려하지 않고 가장 효율적인 고효율기와 절전 기법들로 즉각 교체해갈 때 예상되는 에너지 감축 잠재량을 말한다. 단계별 기술적 잠재량(Phase-In Technical Potential)은 없던 설비를 새로 구매하거나 이미 가지고 있던 설비가 수명이 끝나 새로운 설비를 구매할 때 가장 효율적인 기술을 선택할 경우의 에너지 감축 잠재량을 말하는 것이다. 경제적 잠

잠재량(Economic Potential)은 경제적으로 비용효과적인 고효율기술만을 도입할 때의 기술적 절감 잠재량을 말한다.⁹⁾ 그리고 도달 가능 잠재량(Achievable Potential)은 현실세계의 제약을 고려했을 때 현실적으로 달성할 수 있는 잠재량을 말하며,¹⁰⁾ 정책적으로 달성 가능한 잠재량(Policy-based achievable potential)은 수요관리에 대한 다양한 정책을 통해 달성할 수 있는 에너지 감축잠재량 개념이라 할 수 있다. 목적에 따라 적절한 에너지 감축잠재량 개념을 선택할 수 있는데, 대체로 기기의 잔존 수명을 고려하면서 고효율 설비 중 비용효과적인 설비를 선택할 때의 감축잠재량이 현실적일 수 있다.

2) 전동기 전력 감축 잠재량 연구

우리나라 전동기를 대상으로 효율개선에 의한 전력 감축량 분석을 한 선행 연구로는 기존 제품과 고효율 제품과의 효율 차이를 이용해 간단하게 계산한 연구도 있고, 모형을 통해 보다 정교하게 추정한 연구들도 있다.

녹색전력연구회(2003)는 전동기 최저효율제도 시행 이전에 고효율 전동기 이용이 저조했을 때 전동기 효율 개선을 위한 최저효율제 도입을 제안하면서 고효율 전동기를 통한 전기 감축 잠재량을 추정하였다. 고효율 전동기와 기존 전동기의 효율 차가 5%이고 전동기의 평균 가동시간 4,274시간, 부하율 70%라는 것을 전제로 2010년 예상 전동기 용량에 적용해 감축 잠재량 7,927 GWh

9) 경제적 잠재량을 다시 개인 기업(business)차원의 경제적 잠재량과 거시경제적(macroeconomic)차원의 경제적 잠재량 관점으로 구분하기도 한다. 그리고 사회 전체적인 관점에서의 비용효과적인 에너지 감축잠재량으로서 사회적(후생기반) 잠재량(Societal or welfare-based potential)도 있다(UNDP, 2000).

10) 이는 수요관리 기기와 프로그램에 대한 소비자의 수용도라도 할 수 있다. 혹은 이와 비슷하게 별다른 수요관리정책을 시행하지 않고 시장의 통상적인 움직임에만 의존하여 자연적인 효율개선이나 에너지 절감을 통해 달성될 수 있는 에너지 감축잠재량으로 자연발생 잠재량(Naturally Occurring Potential)을 정의하기도 한다(산업자원부, 1998; EPRI, 1993). 또는 에너지 가격이나 소비자 선호, 에너지 정책 등 주어진 조건하에서 주어진 기간 동안 실현될 수 있을 것으로 기대되는 에너지 효율 개선에 의한 에너지 감축 잠재량으로서 시장 트렌드 잠재량(Market trend potential or expected potential)을 정의하기도 한다(UNDP, 2000). 이 논문에서는 이들이 비슷한 범주에 있다고 판단하여 따로 구분하지 않는다.

를 추정하였다. 지식경제부(2010a)에서는 우리나라 전동기 사용실태와 보급 통계를 바탕으로 삼상유도 전동기의 일부를 고효율 유도전동기로 교체했을 때의 전력 감축잠재량을 산정하였다. 아울러 캘리포니아 비용테스트를 통해 총자원비용 테스트(Total Resource Cost Test) 관점에서 경제성이 있다는 결과를 얻었다.¹¹⁾

지식경제부(2011)는 전동기를 포함한 용도별 에너지기술과 경제부문(발전, 산업, 가정, 상업, 수송)을 대상으로 MARKAL(MARKet ALlocation) 모형을 이용해 2005년부터 2050년까지의 에너지 수요 및 이산화탄소(CO₂) 배출량을 전망하였다. 시나리오는 Baseline 시나리오¹²⁾와 정부의 집중적인 R&D 투자 시나리오, 정부의 집중적 R&D가 없는 시나리오로 설정하여 분석하였다. 이 연구에서는 전동기 신기술을 고효율 전동기, 고속전동기, 저속·고토크 전동기로 구분하고, 기존 기술이 모든 신기술과 경쟁하는 경우와 고속전동기와 저속·고토크 전동기를 제외하고 고효율 전동기와 경쟁하는 경우로 나눠 분석하였다.

온실가스종합정보센터(2011a)는 MESSAGE 모형을 이용하여 제4차 에너지

11) 캘리포니아 비용 테스트(California Standard Practice Test)는 수요관리 프로그램의 비용과 편익을 비교하여 분석하는 기법으로 미국을 중심으로 광범위하게 사용되고 있으며, 우리나라에서도 이를 활용하고 있다. 여기서 다루는 편익항목은 수요관리로 인한 설비회피비용을 잡는 데 피크전력삭감효과를 추정하고 kW당 설비회피비용을 곱하는 방식으로 계산한다. 비용항목은 관리비용, 지원금, 요금감소(전력구입비 감소 포함)를 포함한다(국회예산정책처, 2011). 캘리포니아 테스트는 4가지 서로 다른 관점에서 수요관리 프로그램을 평가하는 것이 특징인데, 참여자 테스트, 전력회사 비용 테스트, 수용가 영향도 테스트, 총자원 비용테스트를 평가한다(California Energy Commission and California Public Utilities Commission, 2001). 전력회사비용 테스트(Utility Cost Test)는 전력회사 관점에서 수요관리 프로그램을 시행하는 것이 비용 효과적인지를 평가하는 테스트이다. 참여자 테스트(Participant Test)는 프로그램에 참여하는 수용가의 관점에서 수요관리 프로그램을 하는 것이 비용 효과적인지를 평가한다. 수용가 영향도 테스트(Rate Impact Measure Test)는 수요관리 프로그램을 통해 전기요금이 변화될 수 있는 영향을 평가한다. 그리고 총자원비용 테스트(Total Resource Cost Test)는 이전의 다른 평가들이 어느 한 차원만 평가한다는 한계 때문에 수요관리 프로그램의 종합적인 효과를 평가하는 것이다. 즉, 전력회사와 참여자로부터 발생하는 모든 비용과 편익을 평가한다.

12) 에너지경제연구원의 ‘기술적 온실가스 감축잠재량 분석을 위한 장기 에너지수요전망(2006.10)’을 바탕으로 했다(지식경제부, 2011).

이용합리화 기본계획의 전동기 효율 개선 목표와 최저소비효율제 목표를 바탕으로 우리나라 제조업에서의 전동기 감축 잠재량을 2007~2020년까지 분석하고, 이를 업종별 전동기 전력사용량 비중을 이용하여 업종별로 세분화하였다. 그러나 업종별로 이용되는 전동기 종류와 특성에 대한 고려 없이 단순히 전력사용량 비중으로 나뉘고 추가적인 감축방안으로 신기술만 고려했다는 점에서 한계가 있다.

한편, 해외 연구에서 우리나라를 포함한 주요국을 대상으로 전동기의 에너지 수요량을 추정하거나 효율 개선에 의한 전력 감축 잠재량을 분석한 경우도 있다. IEA(2011)는 상향식 접근과 하향식 접근 방법을 병행하여 한국을 포함한 세계 주요 국가들의 전동기 전력 소비량을 추정하였다.¹³⁾ 상향식 접근으로 연간 전동기 판매량과 운전재고(running stock) 및 전동기의 평균 크기, 효율, 운용시간, 부하율 등을 바탕으로 국가 전체의 전동기 전력 사용량을 계산하였다. 하향식 접근으로 전동기의 전기 사용 비중을 가정하고 이를 부문별 전기 사용량에 적용시켜 전동기 전력 사용량을 추정하였다. 이렇게 상향식 접근과 하향식 접근 방법을 병행하는 것은 신뢰성 있는 일관된 데이터가 부족할 때 쓸 수 있는 하나의 방법이다.

EOLBNL(2012)은 한국을 포함한 주요 13개국에서 최저효율기준(Minimum Efficiency Performance standards, MEPS) 시행으로 인한 전동기 전력 감축 잠재량을 추정하였다. 방법론은 상향식 에너지 분석 시스템(Bottom-Up Energy Analysis System, BUEAS)을 이용하였으며,¹⁴⁾ 2015년에 주요 국가들이 최저효율기준으로 BAT를 적용시킨다고 가정하고,¹⁵⁾ 2020년, 2030년의 최대 기술적 감축 잠재량을 분석하였다.¹⁶⁾ 분석 결과, 한국은 2020년 5.8 TWh,

13) 주요국 데이터는 2006년도 자료를 활용하였으며, 우리나라 데이터의 출처는 표시되어 있지 않다.

14) Lawrence Berkeley National Laboratory에서 구축한 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning System) 모형을 이용하였다(EOLBNL, 2012).

15) BAT 목표는 SEAD(Super-efficient Equipment and Appliance Deployment) initiative 관련 기술분석 자료, 미국 에너지부(DOE) 기준 프로그램 관련 기술 지원문서인 'the Max Tech and Beyond study' 자료, EU Ecodesign program 관련 자료, 일본 탑러너(Top Runner) 프로그램 자료 등을 바탕으로 설정하였다(EOLBNL, 2012).

16) 2020년에는 2015년에 개선된 효율상승분만큼 효율개선 목표가 상승한다고 가정하거나 혹은 아예 BAT가 2020년에 도달된다고 가정하였다.

2030년 16 TWh의 전력 감축잠재량이 있다고 보았다. 그러나 전동기의 기술 데이터나 통계 자료, 정책 설계가 우리나라 현실을 제대로 반영하는데 미흡했다.

Letschert et al.(2012)은 한국을 포함한 주요 13개국에서 최저효율기준을 시행할 때의 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 분석하고, 이를 바탕으로 비용효과적인 최저효율제 옵션의 에너지 감축잠재량을 분석하였다. 이 연구는 비용효과 측면에서의 전동기 감축 잠재량을 분석했다는 점에서 의미가 있으나, 우리나라 전동기 데이터 수집이 어려워 다른 국가 수치를 대리값으로 사용하였고 산업용 전동기는 제외하고 가정용 전동기를 가지고 분석했다는 한계가 있다.

이처럼 우리나라 전동기를 대상으로 한 전력 감축잠재량 추정 연구들은 간단하게 효율 차이만을 이용해 단순계산하거나 최저소비효율제도를 고려하지 않고 분석하기도 했고, 최저소비효율제도를 반영하더라도 우리나라 실정과 다른 데이터나 정책설계를 가지고 분석을 수행하였다. 또한 최저효율제도 이외의 추가적인 전동기 소비전력 감축방안에 대한 분석까지는 별로 이루어진 적이 없다. 이런 점에서 보면, 우리나라에서 이미 구축된 기술, 통계 데이터를 잘 활용하고, 최저효율제도 정책을 잘 반영하며, 아울러 인버터 장착이나 부하율 개선과 같은 추가적인 방안까지 고려한 보다 상세하고 정교한 모형을 통한 전동기 전력소비 감축량 분석이 필요하다.

3. 전력 수요 추정 및 가격탄력성

전력수요 예측과 같이 미래의 어떤 현상을 예측하기 위해서는 모형을 이용하지 않을 수도 있고, 모형을 이용하는 방법도 있다. 전자는 경제지표 등을 이용하거나 설문을 통해 할 수 있는 비교적 간단한 방법이고, 후자는 다시 모형의 설정 과정이 계량경제이론을 근거하는지 그렇지 않은지에 따라 구조 모형(Structural model)과 비구조 모형(Nonstructural model)으로 나눌 수 있다. 구조 모형은 거시계량경제이론을 바탕으로 경제변수 간의 여러 관계에 대한 연립방정식을 통해 전망을 하는 모형이라 할 수 있으며, 비구조 모형은 경제이론 없이 과거 거시경제변수들의 행태를 근거로 미래를 전망하는 모형이다. 구조 모형은 미래에 대한 예측을 함에 있어 예측에 대한 원인 규명이 필요하고 그것을 위해 경제이론의 뒷받침이 되어야 한다는 측면에서 의미가 있다. 그러나 경제이론이 반드시 현실에 대한 설명력을 높일 수 있다고 보기 어려운 측면도 있고 오히려 연구자의 이론적 선호에 따라 결과가 달라질 수 있다는 비판으로 인해 이론적 선입견을 배제한 상태에서 현실경제의 흐름을 규명하고자 시계열 모형과 같은 비구조 모형도 생겨났다(곽상경, 2006; 김기화, 1990).

전력의 수요함수 추정이나 탄력성 추정에 관한 연구들은 방법론이 다양하고 여러 차원에서 구분할 수 있는데, 경제이론을 기반으로 하는 구조 모형과 그렇지 않은 비구조 모형으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

1) 구조 모형 접근

계량경제이론을 바탕으로 생산 모형에 근거한 계량경제학 방법 중 하나로 초월대수 모형(Transcendental Logarithmic Model; Translog model)이 있다. 초월대수 모형은 경제이론에 근거를 두고 있고, 수요행태에 최소의 제약을 가해 유연한 모형 설정이 가능하며, 특정한 수요 특성에 대한 검증도 가능하다는 장점이 있다(나인강·류지철, 2000). 그러나 초월대수 함수 형태는 일

부 측면에서 경제 이론과 맞지 않는 점들도 있는데, 일부 에너지원의 가격탄력성이 양(+)의 값으로 나타나기도 하고,¹⁷⁾ 동적 초월대수 모형(Dynamic Translog model)에서 장기 탄력성 값이 단기 탄력성 값보다 작을 경우도 있다(박창수, 2003; Jones, 1996).

초월대수 함수는 경제이론에 일부 부합되지 않는 단점에도 불구하고, 국내 에너지 대체관계 관련 탄력성 추정 연구에서 많이 사용되어 왔다. 김수이(2007)는 2단계 초월대수 모형을 이용하여 1990~2004년 자료를 가지고 제조업 11개 업종에 대해 업종별로 에너지원 간 대체탄력성과 에너지원별 자기가격탄력성을 추정하였다. 그 결과, 전력 비중이 높은 기계류 제조업에서는 전력가격 증가에 따라 전력 수요가 증가하는 것으로 나왔고, 음식담배, 펄프인쇄, 석유화학, 일차철강업에서 전력의 자기가격탄력성이 비탄력적으로 나왔다. 그리고 김승래 외(2009)는 2단계 초월대수 비용함수를 이용하여 1987~2007년 자료를 가지고 우리나라 제조업과 수송 분야에서의 에너지원 간 대체탄력성을 추정하였다. 기본 모형과 함께 기술변화가 에너지원 간 대체에 미치는 효과를 살펴보기 위해 에너지절감 투자변수를 포함한 확장 모형도 분석하였는데, 기본 모형에서는 전체 제조업에서 전력 수요의 가격탄력성 0.024, 확장 모형에서는 0.502로 추정되었다.

한편, 초월대수 함수의 단점을 보완하여 사용된 것이 선형 로짓(Linear Logit Model) 모형이다. 선형 로짓 모형은 초월대수 함수에 비해 경제이론에 근거한 생산함수 특성에 훨씬 더 잘 부합하는 것으로 나타났다(Considine, 1989). 국내에서는 박창수(2003)가 선형 로짓 비용 비중 모형(Linear Logit Cost Share Model)을 사용하여 1981~2001년까지의 자료를 바탕으로 우리나라 제조업 부문에서 사용되고 있는 연료용 에너지원 간 대체탄력성과 에너지원별 가격탄력성을 추정하였다. 모형은 정태적 모형과 동태적 모형을 기본으로 하였고, 여기에 시간의 흐름에 따른 기술진보를 가정하여 추세변수를 추가하거나 혹은 제조업 산출량 변수까지 추가하여 모형을 확장시켜 비교분석하였다. 그리고 모형 간 카이제곱(χ^2) 검정을 통해 동태적 선형 로짓 모형에서

17) 이는 초월대수 비용함수가 연료 가격에 있어 음(-)의 자기가격효과(own-price effect)를 위한 오목성(concavity) 조건을 만족하지 못하기 때문에 발생한다(Considine, 1989).

추세변수 및 제조업 산출량 변수까지 포함한 모형이 가장 바람직한 것을 확인하였으며, 전력 수요의 가격탄력성은 기본 모형의 경우 정태 모형 0.082, 동태(단기) 모형 0.155, 동태(장기) 모형 0.185였고, 시간추세를 고려했을 경우 정태 모형 0.120, 동태(단기) 모형 0.152, 동태(장기) 모형 0.147이었다.

박광수(2005)는 선형 로짓 비용 비중 모형을 사용하여 1981~2004년까지의 자료를 바탕으로 우리나라 제조업 부문에서 사용되고 있는 연료용 에너지원 간 대체탄력성과 에너지원별 가격탄력성을 추정하였다. 모형은 정태적 선형 로짓 모형과 동태적 선형 로짓 모형을 기본으로 하되, 환경변수의 대리변수로 저유황 연료유 사용 의무 기준을 추가하여 환경규제가 연료 대체에 미친 영향도 분석하였다. 이렇게 구한 모형의 전력 수요의 가격탄력성은 정태 모형 0.167, 동태(단기) 모형 0.102, 동태(장기) 모형 0.110으로 나왔으며 환경규제변수를 포함시켰을 경우에는 정태 모형 0.055, 동태(단기) 모형 0.007로 나왔다.

정한경·박광수(2010)는 선형 로짓 비용 비중 모형을 사용하여 산업과 가정 부문을 대상으로 1989~2008년 자료를 바탕으로 에너지원 간 대체탄력성과 에너지원별 가격탄력성을 추정하였다.¹⁸⁾ 로짓 모형을 기본으로 하고 여기에 시간의 흐름에 따른 기술진보를 가정하여 시간추세변수를 추가한 모형도 분석하였다. 산업부문의 경우, 전력 수요의 가격탄력성은 기본 모형일 경우 0.459, 시간추세를 반영한 모형일 경우 0.460으로 추정하였다.

한편, 차경수 외(2008)는 1980(1981)~2007년 데이터를 이용하여 거시경제 블록과 에너지 블록을 묘사하는 45개의 연립방정식 모형(Simultaneous Equations Model)을 구축하였고,¹⁹⁾ 거시경제변수와 에너지수급 관련 변수 상호간의 영향을 고려한 중장기 에너지수급을 전망할 수 있도록 하였다. 거시경제 블록은 최종수요, 총공급, 대외거래, 물가, 금융, 재정부문으로 구성되어 있고, 에너지 블록은 산업, 가정·상업, 공공, 기타, 수송 부문의 석탄, 도시가스, 석유, 전력에 대한 최종수요와 원별 국내가격변수에 대한 추정식으로 구성되어 있다. 산업부문의 전력수요는 산업용 실질 전력가격, 실질국민소득을 주요 변수로 하였으며, 가격탄력성은 0.045로 추정하였다.

안지운(2011)은 에너지 효율이나 신재생에너지의 기술변수를 고려한 기

18) 가정부문은 1987~2009년 자료를 이용하였다(정한경·박광수, 2010).

19) 거시경제 블록은 1980년부터, 에너지 블록은 1981년부터의 자료를 사용하였다.

술·경제 통합적인 에너지 모형을 구축하였고, 이는 경제, 에너지, 환경 모듈로 구성된 30개의 연립방적으로 구성되어 있다. 데이터는 1970(1972)~2009년의 자료를 이용하였으며, 산업용 전력수요 함수는 전년도 산업부문 전력소비량과 전력의 생산자물가지수, 실질부가가치를 주요 변수로 하였다.²⁰⁾

2) 비구조 모형 접근

가장 간단하게는 선형을 가정하고 경제변수인 산업 부가가치(GDP) 혹은 산업 생산지수, 산업용 전력요금을 주요변수로 해서 보통최소자승법(Ordinary Least Squares; OLS)을 이용해 추정하는 방법이 있다(나인강·류지철, 2000).

한편, 전력수요 추정에 필요한 변수들의 시계열 자료가 단위근을 갖는 불안정한 시계열 자료일 경우, 안정적 시계열 자료에 적용하는 전통적 계량 이론을 그대로 적용하게 되면 가성회귀(Spurious Regression) 현상이 발생하게 된다. 가성회귀현상은 변수들 간에 아무런 상관관계도 없어도 R^2 값 또는 t 통계량이 높게 나와 마치 상관관계가 있는 것과 같은 현상이다(남준우·이한식, 2010). 이런 경우 불안정한 시계열 자료를 1차 차분하여 회귀분석을 하면 불안정성이 없어지기는 하지만, 그로 인해 변수 간 장기적 관계 정보를 잃게 된다(박범조, 2007). 그런데 불안정한 시계열일지라도 변수 간 공적분 관계가 존재하면 회귀 분석과 같은 전통적인 계량 이론을 적용할 수 있다. 공적분(cointegration) 관계란 “개별 경제변수들이 단기적으로는 서로 괴리를 보이지만 장기적으로는 어떤 일정한 관계”가 있는 것을 말한다(남준우·이한식, 2010). 공적분을 활용한 회귀분석 방법들로는 자기회귀시차 모형(ADRL), Engle-Granger 공적분 방법, Johansen-Joselius 추정 방법, Stock-Watson 추

20) 안지운(2011)에서 설정한 산업용 전력수요의 회귀식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log(\text{산업용 전력수요}) &= -6.77920175367 + 0.0515417855709 \times \log(\text{산업용전력수요}(-1)) \\ &+ 0.0205649076498 \times \log(\text{실질전력가격}) + 1.15593410906 \times \log(\text{실질부가가치}) \\ &+ [\text{AR}(1) = 0.835962298916] \end{aligned}$$

이때 실질전력가격은 전력의 생산자물가지수(2005=100)를 이용하였고 실질부가가치는 십억원 기준이다.

정 방법 등이 있다.

자기회귀시차 모형(AutoRegressive Distributed Lag model; ARDL)은 종속 변수와 독립변수의 시차변수를 설명변수로 추가시킴으로써 모형의 안전성을 높일 수 있고 전통적 방법을 이용한 통계적 가설 검정도 가능하다. 그리고 단기, 장기 탄력성을 한꺼번에 추정할 수 있고 단위근을 갖는 경우에도 활용할 수 있다는 장점이 있다(강만옥·황욱, 2010; 나인강·류지철, 2000; 주택산업연구원, 2004).

김수덕(2009)은 우리나라 주요 에너지관련 정책 수립 시 이용되고 있는 공적분 모형들에서 타에너지원의 가격변화로 인한 상대가격체계의 변화를 제대로 고려하지 않고 있다고 지적하면서 타에너지원의 가격까지 고려한 ARDL 모형을 이용하여 산업용 전력과 도시가스 수요를 전망하였다.²¹⁾ 전력 수요 전망에서 고려한 타에너지원은 산업부문 BC유와 도시가스이며, 과거 1997~2007년까지의 월별 전력, 도시가스 소비량과 요금과 전산업실질생산지수를 이용하였다. 분석 결과, 전력의 장기 가격탄력성은 0.66, 단기 가격탄력성은 0.15였다.

Engle-Granger(1987)은 Granger 대표 정리(Granger representation theorem)를 통해 X_t 와 Y_t 가 공적분 관계에 있으면 그들 사이에 장기적인 관계가 있고 오차수정 모형(Error Correction Model; ECM)을 통해 단기적인 동태적 관계도 설명할 수 있다고 했다. Engle-Granger 공적분 방법은 2단계 추정법을 통해 두 시계열의 장기적 균형관계와 단기적 동태적 관계를 나타내는 방법이다(나인강·류지철, 2000).²²⁾ 첫 번째 단계에서는 공적분 관계에 있는 두

21) 김수덕(2009)에서 설정한 모형은 다음과 같다.

$$y_t = c + \sum_i c_{1i} y_{t-i} + \sum_{h=1}^{11} c_h D_h + dD98 + \alpha P_t + \sum_j \beta_h PRD_{t-j} + \gamma P_t^{0_1} + \delta P_t^{0_2} + \pi N_t + u_t$$

이때 y_t 는 $\ln(\text{에너지 소비})$, c 는 상수항, D_h 는 월별 더미변수, D_{98} 는 98년도 더미변수, P_t 는 $\ln(\text{에너지 실질가격})$, PRD_t 는 $\ln(\text{전산업실질생산지수})$, $P_t^{0_1}$ 는 $\ln(\text{타에너지1의 실질가격})$, $P_t^{0_2}$ 는 $\ln(\text{타에너지2의 실질가격})$, N_t 는 수용가수(도시가스 추정시에만포함), u_t 는 잔차항을 나타낸다.

22) Engle-Granger 공적분 방법의 2단계는 다음과 같이 나타낼 수 있다(나인강·류지철, 2000).

변수 간의 장기균형식을 OLS를 통해 추정하는데, 이때 변수들 간 공적분 결합은 안정적이다. 두 번째 단계에서는 1단계에서 추정한 식으로부터 ε_{t-1} 를 구하고 차분변수 ΔX_{t-i} , ΔY_{t-j} 를 포함시켜 OLS를 통해 추정한다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 얻은 시계열의 장기적 정보를 이용하여 단기적인 불균형을 수정하기 때문에 오차수정 모형이라고 한다(나인강 · 류지철, 2000; 박범조, 2007).

이종수 · 허은영(1998)은 Engle-Granger(1987)와 같이 2단계 추정방법을 이용해 1980~1995년 자료를 바탕으로 우리나라 제조업과 민간 부문의 단기, 장기 전력 가격 탄력성을 추정하였다. 분석결과, 제조업 전력수요의 단기 가격 탄력성은 0.0411, 장기 가격탄력성은 0.3119로 나왔다.

Johansen-Joselius 추정방법은 완전정보 최우추정법(Full Information Maximum Likelihood Estimation; FIML)을 이용하는 것인데, 이 방법은 모든 변수의 내생가능성을 가정하며 장기균형 모형과 오차수정 모형을 다 고려한 완전정보를 이용하는 방법이다. Engle-Granger 방법이 변수 간 공적분 관계가 있을 때 단 한 개의 공적분관계가 존재한다고 가정한 것과 달리, Johansen-Joselius 방법은 여러 개의 공적분 관계가 있을 수 있다고 가정한다(나인강 · 서정환, 1998; 나인강 · 류지철, 2000).

산업자원부(2008)는 한국전력거래소(Korea Power Exchange; KPX)의 장기 전력수요 예측 모형, 성균관대학교의 장기 전력수요 예측 모형(Long-run Electricity Forecasting System; LEFS) 및 자기회귀 모형(AutoRegressive Model; AR), 동적자기회귀 모형(Dynamic Autoregressive Model; DAR)에 대해 순환예측(rolling forecast)을 해서 전력 수요 예측 결과와 예측력을 비교하였다. 특히 LEFS 모형은 시간변동계수를 갖는 공적분 회귀 모형으로서 전력 기술 진보나 경제 성장 속도, 정부 에너지 정책, 소비자 성향 등에 따라 전력 수요 탄력성이 변화도록 설계되었고 일본의 전력수요 탄력성 추이를 활용하였다. 산업용 전력판매량의 수요 탄력성은 0.033으로 추정되었다.

Stock and Watson(1993)은 동태적 보통최소추정법(Dynamic OLS;

$$1\text{단계}) Y_t = \alpha + \beta X_t + \varepsilon_t \quad : Y_t \sim I(1), X_t \sim I(1), \varepsilon_t \sim I(1)$$

$$2\text{ 단계}) \Delta Y_t = \alpha + \gamma \varepsilon_{t-1} + \sum_{i=1}^q \delta_i \Delta X_{t-i} + \sum_{j=1}^p \theta_j \Delta Y_{t-j} + v_t$$

DOLS)을 이용하여 장기 균형식을 분석하는 방법으로 과거 독립변수 값이나 미래 독립변수 값을 추가적으로 활용한다는 점에서 Engle-Granger 추정 방법과 차이가 있다. 그리고 차분 변수의 과거값과 미래값을 이용해 시계열 독립변수 간 동시성 편의(simultaneity bias)를 교정할 수 있다는 점에서 Johansen and Juselius 방식과 비슷하다. 이 방법은 동차 차분함수가 아니어도 장기적 균형관계에 대한 모색이 가능하고, 동시성 편의를 해결할 수 있으며, 최소자승법을 이용해 편리하다는 장점이 있다(나인강·서정환, 1998; 나인강·류지철, 2000; 장병기, 2011).

나인강·서정환(1998)은 1980~1996년 사이의 자료를 바탕으로 4가지 모형, 즉 ARDL 모형, Engle-Granger 모형, Johansen and Juselius(1990)의 FIML, Stock and Watson(1993)의 Dynamic OLS를 이용하여 전력다소비산업과 전력저소비산업의 전력 수요 탄력성을 추정하였다. 그리고 각 모형의 예측력을 검정하여 비교하였는데, 전 산업과 전력다소비산업에서 Stock and Watson 모형의 검정력이 가장 높게 나왔고, 전력저소비산업에서는 ARDL 모형이 높게 나왔다. 모형별 산업 전력수요의 장기 가격탄력성은 전 산업의 경우, ARDL 모형 0.24, Engle-Granger 모형 0.26, Johansen and Juselius 모형 0.55, Stock and Watson 모형 0.40, 다소비산업의 경우, ARDL 모형 0.30, Engle-Granger 모형 0.17, Johansen and Juselius 모형 0.98, Stock and Watson 모형 0.16, 저소비산업의 경우, ARDL 모형 0.11, Engle-Granger 모형 0.22, Johansen and Juselius 모형 0.62, Stock and Watson 모형 0.44로 나왔다.

마찬가지로 나인강·서정환(2000)은 동일 기간에 대해 동일한 4가지 모형을 가지고 산업부문의 전력 수요 탄력성을 추정하였는데 탄력성 추정기간에서 차이가 있었다.²³⁾ 각 모형별 예측력 검정에서는 Stock and Watson 모형의 검정력이 가장 높게 나왔다. 모형별 산업 전력수요의 가격 탄력성은 ARDL 모형 0.06, Engle-Granger 모형 0.26, Johansen and Juselius 모형 0.62, Stock and Watson 모형 0.40으로 나왔다.

이처럼 다양한 방법론을 통해 추정한 전력 수요 함수나 전력수요의 가격 탄력성 값은 모형의 종류나 대상 분야, 데이터의 시간범위, 그외 가정들에 따라

23) 나인강·서정환(1998)은 탄력성 추정기간을 1980~1994년으로 잡았고, 나인강·서정환(2000)은 1983~1994년으로 잡았다.

다양한 값을 보인다.²⁴⁾ 이를 간단히 정리하면 다음 <표 1>과 같다.

24) 이들 가격탄력성 값 중 어떤 값이 현실을 더 잘 반영하는가를 판단하기는 쉽지 않다. 다만 모형분석에 대한 일반론적 시각으로 본다면 모형마다의 특성이 있고, 입력자료와 가정에 의한 결과의 가변성이 크다는 점에서 특정 수치를 과신하기보다는 전반적 경향을 보면서 신중한 접근을 하는 것이 바람직할 것이다.

〈표 1〉 우리나라 산업 및 제조업 부문 전력 수요의 가격 탄력성 연구

연구	모형	분야	데이터	전력의 가격탄력성
김수이(2007)	초월대수 모형	제조업 11개 업종	1990~2004년	
김승래 외(2009)	초월대수 모형	제조업, 수송	1987~2007년	[제조업] 0.024 에너지절감 투자변수 포함 시 0.502
박창수(2003)	선형 로짓 모형	제조업	1981~2001년	기본모형 정태: 0.082, 동태(단기): 0.155 동태(장기): 0.185 시간추세 고려 시 정태: 0.120, 동태(단기): 0.152, 동태(장기): 0.147

박광수(2005)	선형 로짓 모형	제조업	1981~2004년	정태: 0.167, 동태(단기): 0.102 동태(장기): 0.110 환경규제변수 포함 시 정태: 0.055, 동태(단기): 0.007
정한경·박광수(2010)	선형 로짓 모형	산업, 가정	1989~2008년 (산업)	[산업] 0.459 시간추세 반영 시 0.460
차경수 외(2008)	연립방정식 모형	산업, 가정·상업·공공, 수송	1981~2007년	0.045
안지운(2011)	연립방정식 모형	산업, 전환, 가정·상업·공공, 수송	1970(1972) ~2009년	0.0205649076498

김수덕(2009)	ARDL 모형	산업	1997~2007년	단기: 0.15, 장기: 0.66
이종수·허은영(1998)	Engle-Granger 모형	제조업, 민간	1980~1995년	[제조업] 단기 0.0411, 장기: 0.3119
나인강·서정환(1998)	ARDL 모형, Engle-Granger 모형, Johansen & Juselius(1990) 모형, Stock & Watson(1993) 모형	전 산업, 전력다소비산업 전력저소비산업	1980~1996년 (탄력성 추정: 1980~1984)	*전산업, 다소비, 저소비산업 순* ARDL모형(장기) : 0.24, 0.30, 0.11 Engle-Granger모형(장기) : 0.26, 0.17, 0.22 Johanse & Juselius모형(장기) : 0.55, 0.98, 0.62 Stock & Watson모형(장기) : 0.40, 0.16, 0.44

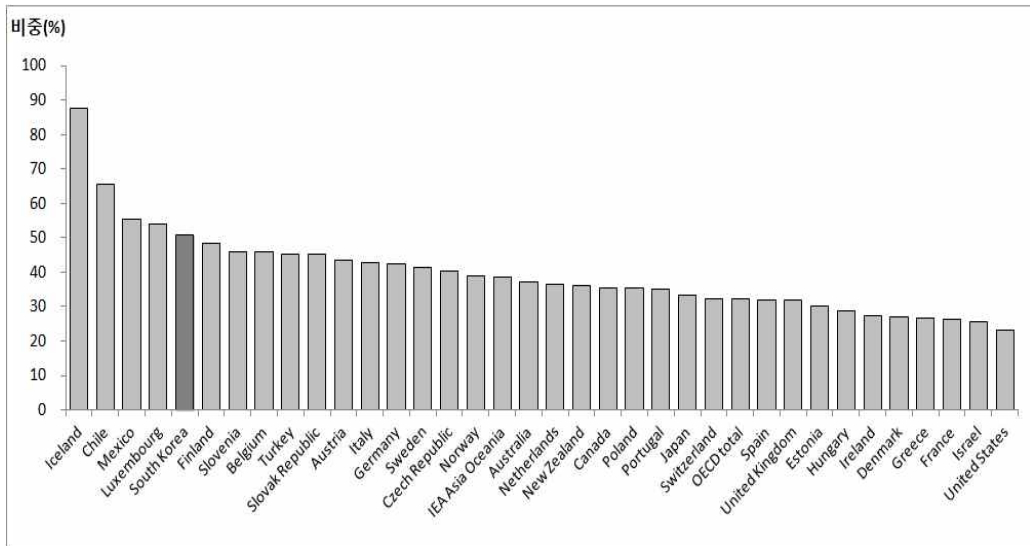
<p>나인강·서경환(2000)</p>	<p>ARDL 모형, Engle-Granger 모형, Johansen & Juselius(1990) 모형, Stock & Watson(1993) 모형</p>	<p>산업</p>	<p>1980~1996년 (탄력성 추정: 1983~1984)</p>	<p>ARDL모형: 0.06 Engle-Granger 모형: 0.26 Johanse & Juselius모형: 0.62 Stock & Watson모형: 0.40</p>
----------------------	---	-----------	---	--

III. 제조업 전동기 전력수요와 전동기 효율향상 정책

1. 제조업 부문의 전동기 전력 수요

1) 제조업 부문의 전력 수요

2011년 우리나라 산업 부문의 전력 소비는 242,204 GWh로서 우리나라 전체 전력소비의 53.2%를 차지했다(지식경제부·에너지경제연구원, 2013). 이는 OECD 국가 중에서 매우 높은 수준인데, 2010년도 기준 산업부문 전력소비 비중을 보면 우리나라(50.8%)는 다음 <그림 2>와 같이 아이슬란드(87.6%), 칠레(65.5%), 멕시코(55.4%), 룩셈부르크(54.0%)에 이어 OECD 5번째이다(IEA, 2012). 이는 OECD 평균 수준 32.1%보다 훨씬 높고 주요 선진국인 독일(42.6%), 일본(33.3%), 영국(31.8), 프랑스(26.4%), 미국(23.1%)보다도 높은 수준이다.

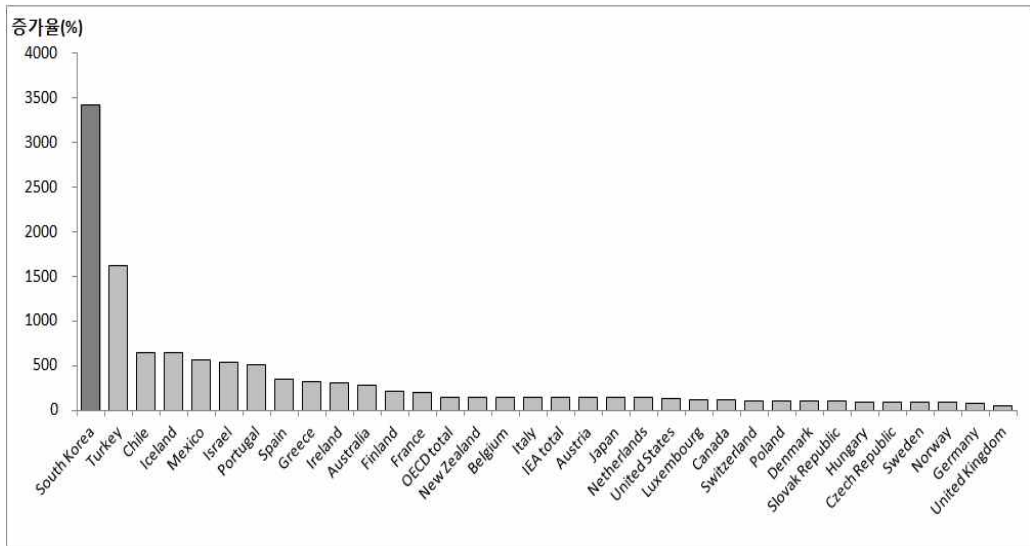


자료: IEA(2012) 재구성

<그림 2> OECD 국가 전력소비에서 산업 비중 (2010년 기준)

특히 산업부문 전기소비량 변화율을 살펴보면 다음 <그림 3>과 같이 우리나라에서는 1973년과 2010년 사이 34배가 증가하여 OECD 국가에서 최고로 높은 증가세를 보였다(IEA, 2012). 이는 OECD 평균 수준 1.5배보다도 훨씬 높고 주요 선진국인 일본(1.4배), 프랑스(2배), 미국(1.3배), 독일(0.7배), 영국(0.4배)보다 상당히 높은 수준이다.²⁵⁾ 이렇게 빠르게 산업부문 전기소비가 증가했던 국가들은 산업뿐만 아니라 전체 전기소비 속도에서도 거의 동일한 양상으로 증가했다. 전체 전기 소비의 연간 평균 변화율(1973-2010년 기준)을 보면, 한국이 10.1%로 OECD 최고수준이고, 이어 터키(7.8%), 아이슬란드(5.7%), 칠레(5.5%), 멕시코(5.3%), 이스라엘(5.2), 포르투갈(5.0%), 스페인(4.1%), 그리스(4.0%), 아일랜드(3.9%), 호주(3.8%)가 뒤를 잇는다(IEA, 2012).

25) 산업부문 전기소비가 빠르게 증가했던 국가들은 국가 전체 전기소비 또한 거의 동일한 양상으로 빠르게 증가했다. 전체 전기 소비의 연간 평균 변화율(1973-2010년 기준)을 보면, 한국이 10.1%로 OECD 최고수준이고, 이어 터키(7.8%), 아이슬란드(5.7%), 칠레(5.5%), 멕시코(5.3%), 이스라엘(5.2), 포르투갈(5.0%), 스페인(4.1%), 그리스(4.0%), 아일랜드(3.9%), 호주(3.8%)가 뒤를 잇는다(IEA, 2012). 이 국가들에서는 산업부문의 전기소비 증가가 국가 전체 전기소비 증가를 주도한 것으로 추론할 수 있다.

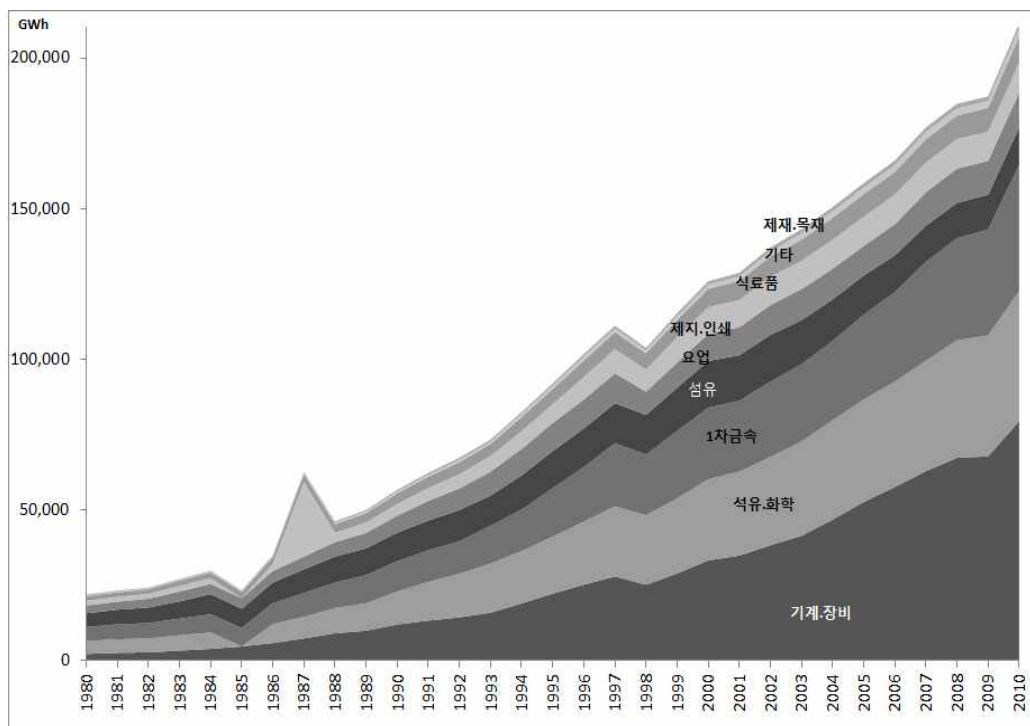


주. 1973년 대비 2010년의 산업부문 전력소비량을 계산한 것임(1973=100%).

자료: IEA(2012) 재구성

<그림 3> OECD 국가 산업부문 전력소비 증가율 (1973-2010년)

우리나라 산업 중 제조업에서 소비하는 전력은 2011년 기준 229,701 GWh로서 우리나라 전체 전력소비의 50.5%를 차지했으며, 1980~2010년 사이 연평균성장률 7.6%씩 증가해왔다. 이를 업종별로 살펴보면 다음 <그림 4>와 같다. 1990년대 들어 기계장비 제조업과 석유화학, 1차금속 업종을 중심으로 전기사용량이 빠르게 증가하였고, 2010년 현재 이들 업종들이 차지하는 비중은 전체 제조업 전기소비의 60%이상을 차지하였다.



자료: 에너지경제연구원 국가에너지통계종합정보시스템 재구성

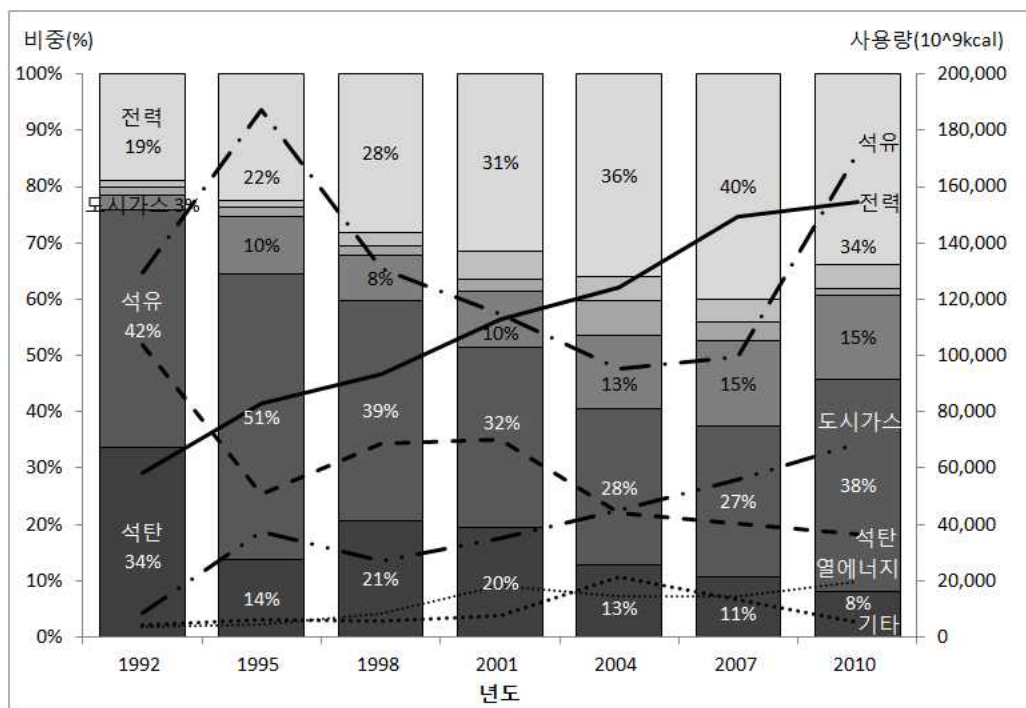
<그림 4> 우리나라 연도별 업종별 전기소비량

제조업에서의 전력 소비는 사용량도 늘었지만 에너지원별 비중에 있어서도 늘었다. 에너지총조사²⁶⁾ 자료에 근거해 우리나라 제조업 설비용²⁷⁾에서 사용

26) 에너지총조사는 우리나라 에너지 수요 전 부문에 대한 에너지소비실태를 파악하기 위해 1981년부터 에너지경제연구원에서 매 3년마다 시행하고 있다. 9차 한국표준산업분류에서의 산업분류 기준을 바탕으로 각 부문에 대한 표본을 추출하여 에너지 사용량을 조사한다. 2011년도 조사는 37,511,113개¹⁾의 모집단에서 36,000개(산업 3,900개, 수송 11,500, 상업·공공 12,214, 가구 8,000, 대형건물 886)의 표본을 추출하여 2010년 1년 동안의 에너지 사용량을 조사하였다. 모집단 중 37,188,899개는 광업과 제조업을 제외한 모집단 개수이며, 광업과 제조업은 에너지관리공단의 “국가에너지종합정보데이터베이스구축”사업의 조사결과를 활용하였다(지식경제부, 2012b).

27) 제조업에서의 에너지원별 비중을 살펴볼 때, 에너지원 간 대체가 쉽지 않은 ‘원료용’과 ‘수송용’은 제외하고 ‘설비용’ 통계만을 살펴보는 것이 실제적인 에너지원 간 대체 관계를 파악하는데 적합하다. 여기서 ‘원료용’은 “연소를 목적으로 하지 않고 타제품을 생산하기 위해 원료로 사용된 에너지”이며, ‘수송용’은 “해당업체에서 보유하고 있는 차량 및 선박의 연료소비량”을 말한다(지식경제부,

하는 에너지 구성 변화를 살펴보면 다음 <그림 5>와 같다.²⁸⁾ 1992~2010년 사이에 제조업 설비용 분야에서 전기는 도시가스와 함께 비중이 크게 늘었으며, 1992년에 비해 각각 15%p, 12%p씩 증가하였다. 반면, 석유와 석탄의 비중은 줄어 1992년에 비해 각각 4%p, 석유는 26%p 줄었다. 양에 있어서도 전기는 1992년 대비 2010년에 2.7배로 늘었고, 석유는 1.3배로 늘어난 반면, 석탄은 0.4배 수준으로 줄어들었다.²⁹⁾



자료: 1993 · 1996 · 1999 · 2002 · 2005 · 2008 · 2011년도 에너지총조사 재구성

<그림 5> 제조업 설비용 에너지원 비중 및 사용량 추이

2012b).

28) 에너지통계연보는 공급 관점의 에너지 통계이고 에너지총조사는 수요 관점의 에너지 통계이므로 수요 측면에서의 에너지원 비중을 파악하기 위해서는 에너지총조사 자료가 보다 적합하다.

29) 2010년에는 2007년에 비해 전기 비중이 줄고, 석유 비중이 늘었는데, 이 연구에서는 이의 원인에 대한 분석은 다루지 않기로 한다.

2) 제조업에서의 전동기 전력 수요

전동기는 전기에너지를 역학적 에너지로 바꾸는 장치로서 컨베어 시스템, 팬, 펌프, 압축기, 성형기, 교반기, 기타 기계공구 등과 조합을 이뤄 사용되기도 하고, 혹은 단독으로 동력을 생성하는 기능으로 활용되기도 한다. 전동기는 산업을 비롯해 농업, 가정, 공공, 상업 등 전 부문에서 다양한 형태로 공통적으로 사용되기 때문에 건조기, 보일러, 요·로, 조명, 냉방기기 등과 함께 주요 공통기술로 분류되고 있으며, 주요 전력 다소비 기기이다.

전동기는 전 부문에서 공통적으로 사용되고 있으나, 산업에서의 비중이 가장 높다. 다음 <표 2>는 전력 소비가 많은 상위 55개국의 부문별 전동기 전기 소비량을 나타낸 것이다. 전 세계 전력소비의 93%를 차지하는 이들 국가의 전체 전력 수요에서 전동기 전력 수요가 차지하는 비중은 45.8%로 거의 절반에 달하며, 이 중 산업부문의 전동기 전력수요는 전체 전력수요의 29.0%를 차지한다. 이처럼 전체 전력 수요에서 전동기가 차지하는 비중, 특히 산업부문 전동기의 전력 수요가 차지하는 비중이 상당히 높기 때문에 전동기에 대한 전력 수요관리 노력은 매우 중요하다고 볼 수 있다.

<표 2> 주요 55개국의 부문별 전동기 전력수요량

	총전력 수요	부문별 전동기 전력수요 (TWh/year)					
		산업	상업	농업	수송	가정	소계
미국	3,722	632 (17.0%)	498	0	4	297	1,431 (38.4%)
EU-27	2,813	787 (28.0%)	282	13	44	177	1,303 (46.3%)
중국	2,317	1,092 (47.1%)	50	24	13	72	1,251 (54.0%)
일본	981	221 (22.5%)	138	0	11	62	432 (44.0%)
러시아	681	244 (35.8%)	43	4	52	25	367 (53.9%)
캐나다	499	141 (28.3%)	51	2	3	33	229 (44.7%)
인도	506	157 (31.0%)	15	24	6	24	226 (45.9%)
한국	371	131 (35.3%)	46	1	2	12	191 (49.1%)
브라질	375	126 (33.6%)	34	4	1	19	184 (51.5%)
남아프리카공화국	198	78 (39.4%)	11	1	3	8	102 (47.1%)
호주	210	65 (31.0%)	19	0	2	14	99 (44.4%)
멕시코	199	77 (38.7%)	8	2	1	11	98 (49.2%)
대만	207	70 (33.8%)	11	1	1	9	92 (51.5%)
우크라이나	130	47 (36.2%)	8	1	6	6	68 (41.1%)
터키	141	46 (32.6%)	14	1	0	8	68 (30.8%)
태국	128	41 (32.0%)	16	0	0	6	62 (48.2%)
이란	151	36 (23.8%)	10	4	0	11	62 (52.3%)
노르웨이	108	34 (31.5%)	8	0	1	7	51 (48.4%)
인도네시아	113	30 (26.5%)	10	0	0	10	49 (43.4%)
아르헨티나	99	33 (33.3%)	9	0	0	6	48 (47.2%)
사우디아라비아	143	9 (6.3%)	16	1	0	19	44 (48.5%)
베네수엘라	81	28 (34.6%)	7	0	0	5	40 (49.4%)
파키스탄	73	15 (20.5%)	4	2	0	7	28 (38.4%)
스위스	58	13 (22.4%)	6	0	2	4	26 (44.8%)
베트남	49	16 (32.7%)	2	0	0	5	22 (44.9%)
이스라엘	46	8 (17.4%)	6	1	0	3	18 (39.1%)
뉴질랜드	38	10 (26.3%)	3	0	0	3	17 (44.7%)
방글라데시	22	6 (27.3%)	1	0	0	2	9 (40.9%)
코스타리카	8	1 (12.5%)	1	0	0	1	3 (37.5%)
55개국 소계	14,465	4,193 (29.0%)	1,324	89	153	862	6,621 (45.8%)
전 세계	15,660	4,488 (28.7%)	1,412	101	159	948	7,108 (45.4%)

주: 1. 자료는 2006년도 기준 수치임.

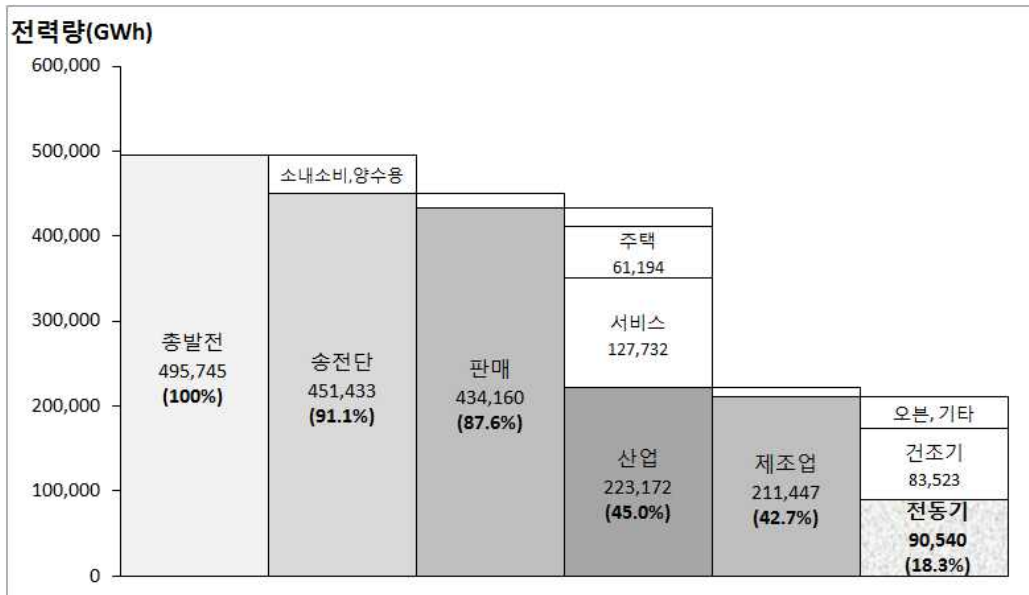
주: 2. 우리나라 데이터의 경우, 정확한 출처를 밝히지 않음.

출처: IEA(2011)

<표 2>에서 IEA(2011)에서 조사한 우리나라 제조업 전동기 전력 소비량이 제시되었으나, 추정에 이용한 데이터의 출처가 정확하게 언급되어 있지 않고 2006년 수치여서 새로이 추정해 볼 필요가 있다. 우리나라 제조업에서의 전동기 전력 소비량을 추정해 보는 방법으로 에너지통계연보의 제조업 전력사용량과 에너지총조사의 제조업에서의 동력용 전력사용량 비중을 이용할 수 있다. 에너지 통계연보는 공급 관점의 통계이기 때문에 제조업의 전체 전력 사용량에 대한 정확한 정보를 파악할 수 있고, 에너지총조사는 설문조사 중심의 수요 관점 통계이기 때문에 에너지원별 용도별 비중에 대한 보다 세부적인 정보를 얻을 수 있다. 2011년도 에너지총조사에 의하면 2010년도 우리나라 제조업 전체 전기 사용량 중에서 전동기를 의미하는 동력용³⁰⁾이 차지하는 비중은 업종별로 37.0~54.2%이고,³¹⁾ 이를 2010년도 에너지통계연보의 업종별 전력 사용량에 각각 곱해 더하면 2010년도 제조업 전동기 전력사용량이 90,540 GWh임을 추정할 수 있다. 이 수치를 좀 더 용이하게 파악하기 위해 우리나라 2010년도 총발전량과 송전단, 판매, 산업, 제조업, 전동기 수준까지의 전력량을 비교해 보면 다음 <그림 6>과 같다. 우리나라 총 발전량의 87.6%인 434,160 GWh가 판매되고, 판매량의 48.7%인 211,447 GWh가 제조업에서 사용되며, 그 중에서 90,540 GWh가 전동기에서 사용하는 전력량이다.

30) 동력용이란 “자가발전용 디젤기관, 가스터빈 등 내연기관에서 사용한 연료 및 기타 동력용에서 사용한 연료”를 지칭하는데(지식경제부, 2012b), 자가발전이나 디젤기관, 가스터빈은 화석연료를 이용한다. 따라서 동력용 에너지 중 전기는 모두 전동기가 소비한 에너지로 볼 수 있으며, 이는 전체 동력용 에너지의 69.8%(2010년 기준)를 차지한다(지식경제부, 2012b).

31) 제조업 평균 전동기 전력사용량 비중은 42.9%이고, 공정용히터및건조기 비중은 39.0%, 오븐용은 9.5%, 기타 8.7%를 차지했다. 이처럼 전동기와 공정용히터및건조기가 제조업 전력수요의 대부분을 차지한다(지식경제부, 2012b).



주: 1. 2010년도 자료임.

2. 괄호 안 수치는 총 발전량 대비 비율임.

3. 총발전량, 송전단전력량, 판매량, 산업·제조업 전력량은 에너지통계연보 자료이며, 전동기와 건조기, 오븐·기타 값은 2011년도 에너지총조사를 이용하여 계산하였음.

4. 전동기, 건조기, 오븐·기타는 제조업에 이용되는 것에 한함.

5. 색깔이 없는 부분은 그 외 전력소비 부문임.

<그림 6> 우리나라 부문별 주요 전력량

우리나라 제조업 전기 소비에서 전동기가 차지하는 비중은 업종별로 차이가 있고, 연도별로도 변화되어 왔다. 다음 <표 3>은 에너지총조사를 기반으로 전력 소비에서 업종별 연도별 전동기 비중을 나타낸 것이다. 연도별로는 2001년까지는 전동기 비중이 상당히 높았다가 2004년부터 상당히 낮아졌다.³²⁾ 업

32) 에너지총조사에서 2001년 이전과 2004년 이후의 제조업 ‘동력용’ 전기사용량 비중이 크게 차이나는 것은 실제 차이가 있는 것인지 혹은 데이터 샘플의 문제인지 정확하게 판단하기는 어렵다. 그러나 ‘동력용’ 비중이 급격히 변하기 어렵고, 2004년부터 제조업 자료를 에너지관리공단의 “국가에너지종합정보DB구축”사업의 조사결과를 활용했다는 점에 비춰 판단해 보면 샘플 문제로 인한 것으로 추정된다(지식경제부, 2012b).

종별로도 차이가 있는데, 2010년 기준으로는 음식료·담배 업종, 비금속, 가죽·가방·신발, 종이·펄프 업종에서 특히 비중이 높은 것으로 나타났다. 석유화학 업종에서 가장 많은 전동기를 사용하고 1차 철강과 기계장비 업종에서 많은 전동기를 사용한다. 이들 업종들이 전기 사용량 비중이 가장 많은 것과 같은 맥락이다.

<표 3> 전기 소비에서 업종별 연도별 전동기 비중

(단위: %)

	1995	1998	2001	2004	2007	2010
음식료품 제조업	71.2	74.6	73.1	46.7	54.7	56.8
담배 제조업	86.4	86.0	87.9	46.3	62.7	67.9
섬유제품 제조업; 의복제외	99.0	86.1	90.1	47.2	53.9	50.3
의복, 의복액세서리및모피제품제조업	95.7	87.6	85.0	42.3	37.0	17.7
가죽, 가방 및 신발 제조업	87.8	80.4	83.0	19.4	54.2	54.1
목재 및 나무제품 제조업	94.9	86.2	84.3	30.7	51.5	35.9
펄프, 종이 및 종이제품 제조업	85.1	93.2	90.5	41.0	77.7	52.2
인쇄 및 기록매체 복제업	99.4	94.8	94.7	49.6	47.9	31.9
코크스 및 연탄, 석유정제품 제조업	96.7	74.8	69.6	31.9	84.3	48.8
화학물질 및 화학제품 제조업	97.8	98.6	98.6	49.9	57.6	49.0
고무제품 및 플라스틱제품 제조업	95.9	79.4	80.9	50.0	55.5	47.1
비금속광물제품	87.4	85.7	83.3	46.3	68.8	54.2
1차 금속	94.5	87.9	87.8	50.1	40.5	37.0
조립금속제품	26.5	48.1	41.1	49.4	52.1	43.4
기타 기계 및 장비 제조업	86.9	60.6	64.0	45.1	53.3	41.8
사무, 계산, 회계용 기계제조업	54.7	77.5	74.9	43.2	44.1	29.9
기타 전기기계 및 전기변환장치	84.2	71.0	61.7	46.7	44.0	
영상, 음향 및 통신 장비 제조업	75.6	75.3	64.5	45.2	46.6	37.4
의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업	76.5	65.4	63.8	47.3	41.8	40.0
자동차 및 트레일러 제조업	83.0	73.3	81.7	28.1	52.9	35.9
기타 운송장비 제조업	78.4	71.6	70.1	40.3	61.2	50.2
가구 제조업	91.1	59.7	62.1	45.4	48.6	43.7
재생재료 가공처리업	81.4	86.3	79.0	39.6	55.9	42.4

주: 1993, 1996, 1999, 2002, 2005, 2008, 2011년도 에너지총조사를 바탕으로 산정

3) 제조업 업종별 전동기 전력사용량 변화 요인

우리나라 제조업에서의 전동기 전력사용량의 변화 요인을 업종별로 살펴보

기 위해 업종별 전동기 전력사용량에 대해 로그 평균 디비지아 지수(Log Mean Divisia Index, LMDI) 요인분해를 하였다.³³⁾ 제조업의 업종별 전동기의 전기사용량은 다음과 같은 항등식으로 나타낼 수 있다.

전동기의 전기사용량_i

$$= \frac{\text{전동기의 전기사용량}_i}{\text{총전기사용량}_i} \times \frac{\text{총전기사용량}_i}{\text{총에너지사용량}_i} \times \frac{\text{총에너지사용량}_i}{GDP_i} \times GDP_i$$

$$= J_i \times E_i \times I_i \times G_i$$

J_i : i 업종 전기사용량 중 전동기가 소비하는 비중

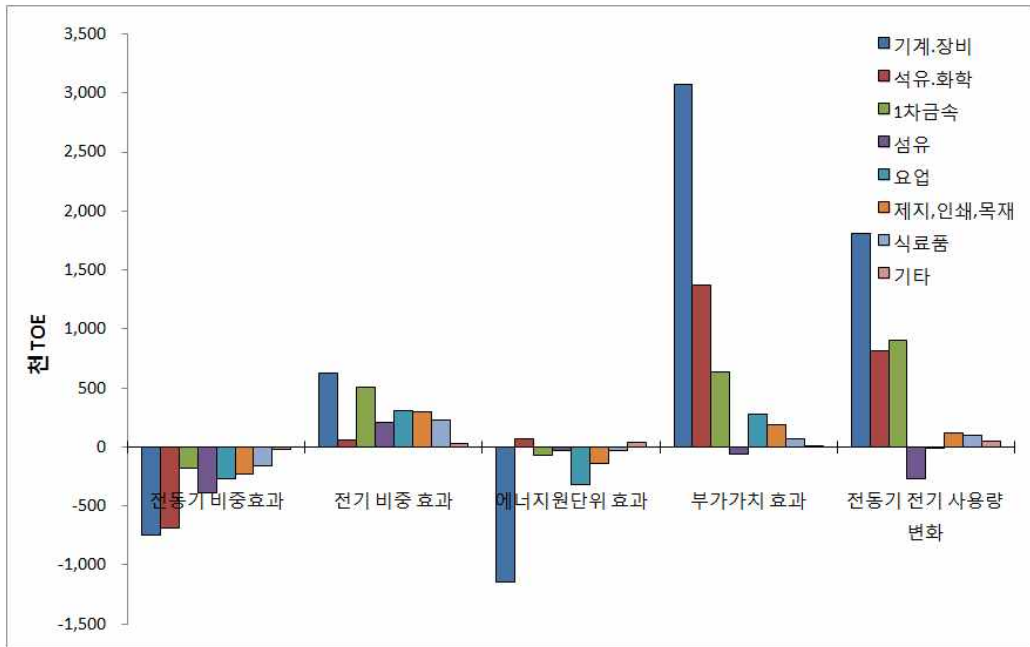
E_i : i 업종 총에너지사용량 중 전기가 차지하는 비중

I_i : i 업종 에너지 집약도

G_i : i 업종 GDP

위 항등식과 같이 국내 제조업 전동기 전기사용량의 변화는 전력사용량 중 전동기가 소비하는 비중 효과와 총 에너지 중 전력의 비중 효과, 에너지집약도 효과, 부가가치 효과로 나뉘볼 수 있다. 1992~2010년 사이의 국내 제조업 전동기 전기 사용량 변화에서 이들 각 효과는 다음 <그림 7>과 같다.

33) LMDI 분해분석에 관한 자세한 설명은 이 논문의 주요 초점이 아니므로 생략한다.

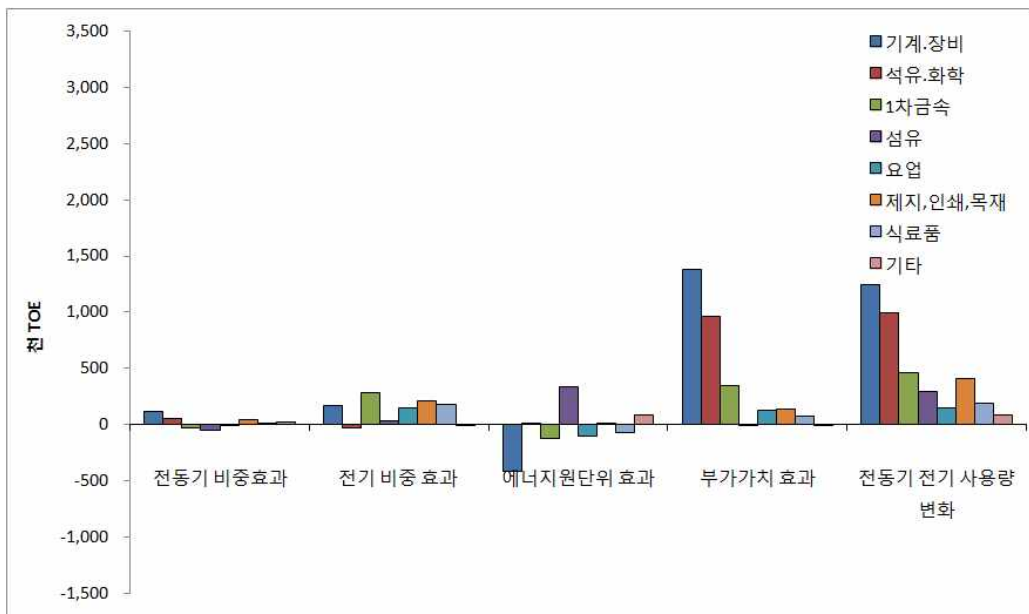


주: 자료는 1992~2010년도 에너지통계연보, 1993·1996·1999·2002·2005·2008·2011년 에너지총조사, 한국은행 1993~2010년 경제활동별 실질 GDP를 이용함.
<그림 7> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (1992~2010년)

위 <그림 7>에서 보듯이, 1992~2010년 사이 전동기 전기사용량 변화를 업종별로 보면 기계·장비, 석유·화학, 1차금속 업종순으로 전동기 전력소비가 가장 크게 늘었고, 특히 기계·장비의 전력소비 증가가 두드러진다. 이들 업종의 전력소비 증가는 무엇보다 부가가치 증가에 의한 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 기계·장비 업종은 에너지원단위가 상당히 개선되고 전동기 비중이 감소했음에도 불구하고 부가가치가 크게 증가해 전력소비가 크게 늘었다. 석유·화학 업종도 부가가치 증가의 영향이 컸고, 1차금속은 부가가치 증가와 총에너지 중 전기 비중 증가의 영향이 컸다. 나머지 업종들은 상대적으로 전력 사용량이나 각 효과들에서 큰 변화가 없었다.

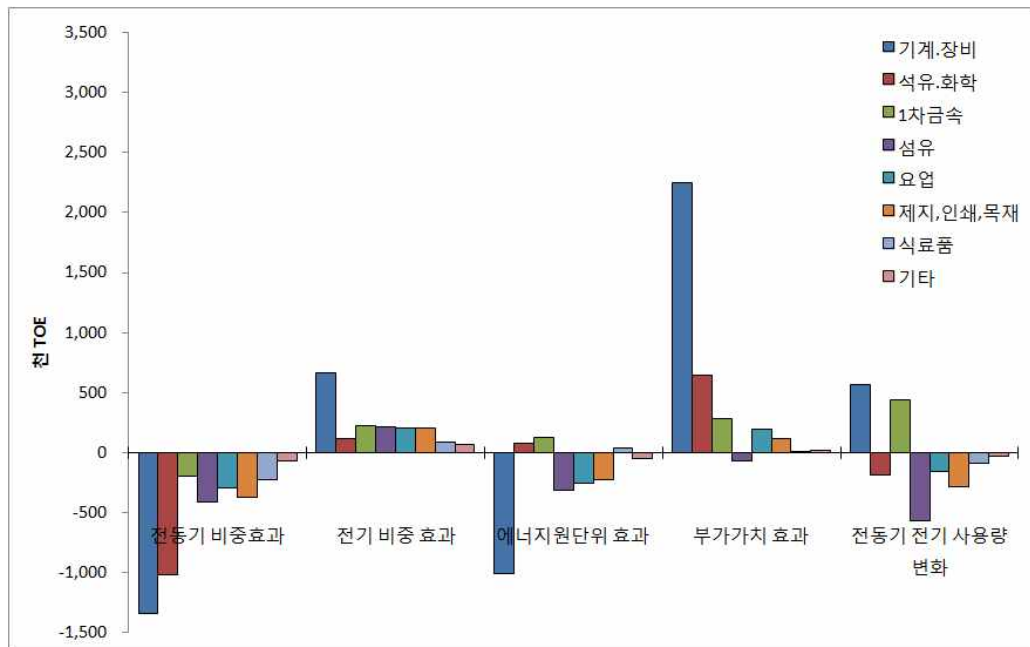
분해분석을 두 기간으로 구분해 1992~2001년과 2001~2010년에 대해 각각 나타내면 다음 <그림 8>, <그림 9>와 같다. 1992~2001년 기간에는 기계·장비와 석유·화학 위주로 부가가치가 증가한 것이 전력소비 증가의 주요 요인이었으며, 2001~2010년 사이에는 기계·장비 업종에서 부가가치가 대폭 증

가했음에도 불구하고 원단위 개선과 전동기 비중의 감소 효과가 커서 전력소비 증가폭이 이전 시기에 비해 줄었다. 그리고 섬유 업종에서 전동기 전력사용량이 줄고 에너지원단위 개선에 의한 효과가 주요하게 영향을 미쳤다.



주: 자료는 1992~2010년도 에너지통계연보, 1993·1996·1999·2002·2005·2008·2011년 에너지총조사, 한국은행 1993~2010년 경제활동별 실질 GDP를 이용함.

<그림 8> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (1992~2001년)

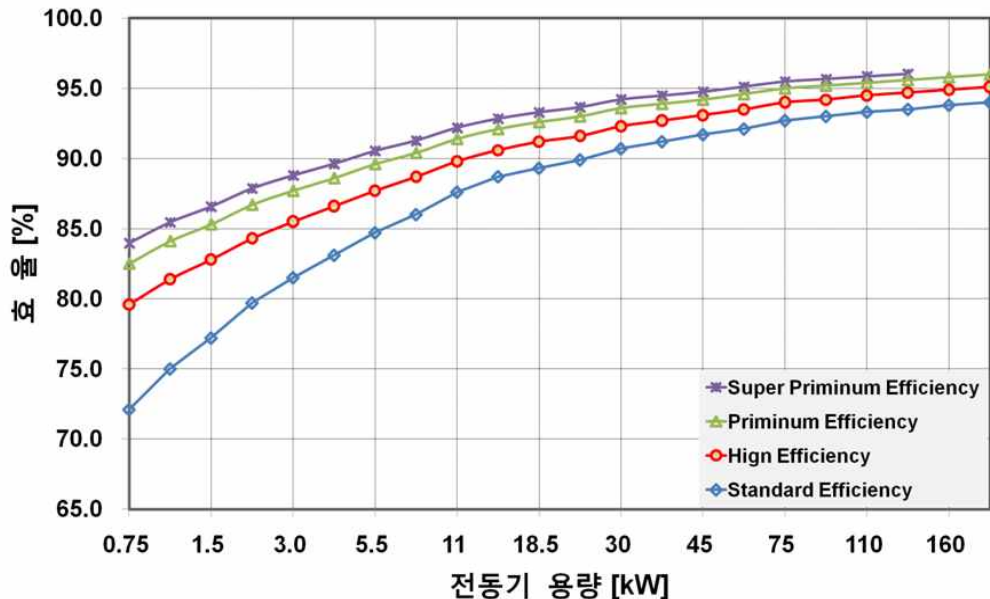


주: 자료는 1992~2010년도 에너지통계연보, 1993·1996·1999·2002·2005·2008·2011년 에너지총조사, 한국은행 1993~2010년 경제활동별 실질 GDP를 이용함.
<그림 9> 우리나라 제조업 전동기 전력 사용량 분해분석 결과 (2001~2010년)

2. 전동기 최저소비효율제도

1) 해외의 전동기 최저소비효율제도

전동기는 효율등급에 따라 표준 효율 전동기(IE1), 고효율 전동기(IE2), 프리미엄 전동기(IE3), 슈퍼프리미엄 전동기(IE4)로 구분할 수 있으며, 후자로 갈수록 효율등급이 높다. 이들 전동기들은 용량이 증가할수록 효율이 점차 증가하고 그 증가율은 용량 증가에 따라 점차 줄어드는 양상을 보이는데, 다음 <그림 10>은 효율등급별 전동기용량에 따른 효율 수준을 나타낸 것이다. <그림 10>에서처럼 용량이 증가할수록 효율은 커지며, 효율등급별로 IE1전동기는 72~93%, IE2 전동기는 80~94%, IE3 전동기는 82~95%, IE4 전동기는 84~96% 효율 수준을 보인다.



주: 1. Standard Efficiency(IE1), High Efficiency(IE2), Premium Efficiency(IE3), Super Premium Efficiency(IE4)

2. 4극 기준임.

출처: 한국에너지기술평가원(2011)

<그림 10> 효율등급별 전동기 용량에 따른 효율 곡선

이처럼 전동기는 효율등급과 용량에 따라 효율 수준이 다른데 각 등급과 용량에 따라 최저의 소비효율 수준을 정해서 전력의 효율적 이용을 도모할 수 있다. 이런 효과를 겨냥한 제도가 바로 최저소비효율제도(Minimum Efficiency Performance Standard; MEPS)인데, 최저소비효율제도란 에너지를 이용하는 기기에 대해 정부차원에서 효율기준의 하한선을 정해놓고 생산자로 하여금 그 이상의 효율을 가진 제품만을 생산, 판매하도록 하는 제도이다. 현재 우리나라를 비롯해 미국과 EU, 캐나다, 호주, 멕시코, 중국, 브라질, 대만, 뉴질랜드 등이 전동기에 대해 최저소비효율제도를 시행하고 있다(IEA, 2011). 그 중에서 비교적 기준이 높고 실효성 있게 실행되고 있는 미국과 EU의 최저소비효율제도를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 미국은 1992년 세계에서 제일 먼저 전동기에 대한 효율규제를 시작했고(EPAct 92), 표준 전동기보다 1~4% 높은 수준의 'EPAct Motor' 기준을 설

정하였다. 이후 2005년에 ‘EPAct 92’보다 강화된 기준인 ‘NEMA Premium’ 기준 전동기를 모든 주에서 구매하도록 하는 ‘Energy Policy Act of 2005(EPAct 2005)’를 의회에서 승인했다. 2007년에는 ‘EPAct 92’에 해당되던 전동기 범위를 업데이트한 ‘Energy Independence and Security Act(EISA)’가 통과되어 2010년부터 발효되었다. 미국에서 전동기 유형·용량별로 적용되는 최저소비효율 기준은 다음 <표 4>와 같다.

<표 4> 미국 최저소비효율제도에서의 전동기 유형·용량별 효율 기준

전동기 유형과 용량	NEMA MG1에 있는 효율 기준
subtype I (1~200HP)	Table 12.12 (NEMA Premium)
subtype I, NEMA Design B (201~500HP)	Table 12.11 (EPAct 92)
소방펌프 모터 (1~500HP)	Table 12.11 (EPAct 92)
subtype II (1~200HP)	Table 12.11 (EPAct 92)

주: subtype I 전동기에는 EPAct 92에 포함되었던 기존의 일반용 전동기가 포함되며, subtype II 전동기에는 EPAct 92에 포함되지 않은 전동기와 subtype I 디자인 요소를 포함한 전동기 중에서 U-Frame 전동기, Design C형 전동기, Footless 전동기, Vertical solid shaft normal thrust, 8극 전동기가 포함됨.

출처: IEA(2011)

그리고 EPAct와 NEMA Premium 전동기의 효율을 표시한 NEMA MG-1 Table 12.11과 Table 12.12는 다음 <표 5>, <표 6>과 같다.

<표 5> EAct 전동기의 전부하 효율기준 (NEMA MG-1 Table 12-11)

HP	개방형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
1	N/A	82.5	80.0	74.0	75.5	82.5	80.0	74.0
1.5	82.5	84.0	84.0	75.5	82.5	84.0	85.5	77.0
2	84.0	84.0	85.5	85.5	84.0	84.0	86.5	82.5
3	84.0	86.5	86.5	86.5	85.5	87.5	87.5	84.0
5	85.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	85.5
7.5	87.5	88.5	88.5	88.5	88.5	89.5	89.5	85.5
10	88.5	89.5	90.2	89.5	89.5	89.5	89.5	88.5
15	89.5	91.0	90.2	89.5	90.2	91.0	90.2	88.5
20	90.2	91.0	91.0	90.2	90.2	91.0	90.2	89.5
25	91.0	91.7	91.7	90.2	91.0	92.4	91.7	89.5
30	91.0	92.4	92.4	91.0	91.0	92.4	91.7	91.0
40	91.7	93.0	93.0	91.0	91.7	93.0	93.0	91.0
50	92.4	93.0	93.0	91.7	92.4	93.0	93.0	91.7
60	93.0	93.6	93.6	92.4	93.0	93.6	93.6	91.7
75	93.0	94.1	93.6	93.6	93.0	94.1	93.6	93.0
100	93.0	94.1	94.1	93.6	93.6	94.5	94.1	93.0
125	93.6	94.5	94.1	93.6	94.5	94.5	94.1	93.6
150	93.6	95.0	94.5	93.6	94.5	95.0	95.0	93.6
200	94.5	95.0	94.5	93.6	95.0	95.0	95.0	94.1
250	94.5	95.4	95.4	94.5	95.4	95.0	95.0	94.5
300	95.0	95.4	95.4	N/A	95.4	95.4	95.0	N/A
350	95.0	95.4	95.4	N/A	95.4	95.4	95.0	N/A
400	95.4	95.4	N/A	N/A	95.4	95.4	N/A	N/A
450	95.8	95.8	N/A	N/A	95.4	95.4	N/A	N/A
500	95.8	95.8	N/A	N/A	95.4	95.8	N/A	N/A

<표 6> NEMA Premium(60Hz) 전동기의 전부하 효율 기준
(NEMA MG-1 Table 12-12)

HP	개방형			전폐형		
	2극	4극	6극	2극	4극	6극
1.0	77.0	85.5	82.5	77.0	85.5	82.5
1.5	84.0	86.5	86.5	84.0	86.5	87.5
2	85.5	86.5	87.5	8.5	86.5	88.5
3	85.5	89.5	88.5	86.5	89.5	89.5
5	86.5	89.5	89.5	88.5	89.5	89.5
7	88.5	91.0	90.2	89.5	91.7	91.0
10	89.5	91.7	91.7	90.2	91.7	91.0
15	90.2	93.0	91.7	91.0	92.4	91.7
20	91.0	93.0	92.4	91.0	93.0	91.7
25	91.7	93.6	93.0	91.7	93.6	93.0
30	91.7	94.1	93.6	91.7	93.6	93.0
40	92.4	94.1	94.1	92.4	94.1	94.1
50	93.0	94.5	94.1	93.0	94.5	94.1
60	93.6	95.0	94.5	93.6	95.0	94.5
75	93.6	95.0	94.5	93.6	95.4	94.5
100	93.6	95.4	95.0	94.1	95.4	95.0
125	94.1	95.4	95.0	95.0	95.4	95.0
150	94.1	95.8	95.4	95.0	95.8	95.8
200	95.0	95.8	95.4	95.4	96.2	95.8
250	95.0	95.8	95.4	95.8	96.2	95.8
300	95.4	95.8	95.4	95.8	96.2	95.8
350	95.4	95.8	95.4	95.8	96.2	95.8
400	95.8	95.8	95.8	95.8	96.2	95.8
450	95.8	96.2	96.2	95.8	96.2	95.8
500	95.8	96.2	96.2	95.8	96.2	95.8

한편, EU는 1998년에 ‘전자기계 및 동력시스템 제조업자 유럽 위원회 (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power systems; CEMEP)를 중심으로 전동기 효율에 관한 자발적 협약을 제정하였고, 전동기 효율에 대한 세 가지 등급인 IE1(Standard Efficiency), IE2(High Efficiency), IE3(Premium Efficiency)를 정의하였다(Brook Crompton, 2010). 이후 협약은 만료되었으나 IE1, IE2, IE3에 대한 기준은 그대로 사용되고 있으며, 다음 <표 7>과 같이 전동기에 대한 최저소비효율기준을 시행해 왔다. 그리고 IE2, IE3 전동기의 효율 기준은 <표 8>과 같다.

<표 7> EU의 전동기 최저소비효율 기준 도입시기와 대상 및 기준

일정	전동기 용량별 적용 효율 등급
2011.06.16 이후	0.75~375kW 전동기에 대해 IE2 기준 적용
2015.01.01 이후	7.5~375kW 전동기 혹은 VSD를 탑재한 IE2 수준 전동기에 대해 IE3 기준 적용
2017.01.01 이후	0.75~375kW 전동기 혹은 VSD를 탑재한 IE2 수준 전동기에 대해 IE3 기준 적용

주: VSD는 가변속도 드라이브(Variable Speed Drive)를 의미함.

<표 8> EU의 전동기 명목 효율 기준(50Hz)

kw	IE2 효율 등급			IE3 효율 등급		
	2 극	4 극	6 극	2 극	4 극	6 극
0.75	77.4	79.6	75.9	80.7	82.5	78.9
1.1	79.6	81.4	78.1	82.7	84.1	81.0
1.5	81.3	82.8	79.8	84.2	85.3	82.5
2.2	83.2	84.3	81.8	85.9	86.7	84.3
3	84.6	85.5	83.3	87.1	87.7	85.6
4	85.8	86.6	84.6	88.1	88.6	86.8
5.5	87.0	87.7	86.0	89.2	89.6	88.0
7.5	88.1	88.7	87.2	90.1	90.4	89.1
11	89.4	89.8	88.7	91.2	91.4	90.3
15	90.3	90.6	89.7	91.9	92.1	91.2
18.5	90.9	91.2	90.4	92.4	92.6	91.7
22	91.3	91.6	90.9	92.7	93.0	92.2
30	92.0	92.3	91.7	93.3	93.6	92.9
37	92.5	92.7	92.2	93.7	93.9	93.3
45	92.9	93.1	92.7	94.0	94.2	93.7
55	93.2	93.5	93.1	94.3	94.6	94.1
75	93.8	94.0	93.7	94.7	95.0	94.6
90	94.1	94.2	94.0	95.0	95.2	94.9
110	94.3	94.5	94.3	95.2	95.4	95.1
132	94.6	94.7	94.6	95.4	95.6	95.4
160	94.8	94.9	94.8	95.6	95.8	95.6
200-375	95.0	95.1	95.0	95.8	96.0	95.8

출처: Commission Regulation (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors.

이처럼 미국과 EU의 전동기 최저소비효율 기준은 우리나라와 달리 373~375kW까지 대용량에 대해서도 기준이 설정되어 있다. 특히 EU의 경우, VSD를 탑재한 전동기에 대해 기준을 더 완화시켜 적용함으로써 VSD 탑재에 대한 인센티브를 부여하고 있다.

2) 우리나라의 전동기 최저소비효율제도

우리나라에서 전동기 효율 향상을 위한 제도는 1996년 고효율전동기에 대한 ‘고효율에너지기자재’ 인증을 시작하였고, 2002년부터는 인증된 고효율 전동기에 대한 장려금을 지급하였다.³⁴⁾ 그러나 이러한 지원에도 불구하고 고효율 전동기의 시장점유율이 10%(2005년 기준)를 넘지 못하자 정부에서는 정책 방식을 의무 규정으로 전환하기로 하고 2008년부터 전동기에 대한 최저소비효율제도를 시행하기로 결정하였다.³⁵⁾

전동기 최저소비효율제도는 현재 산업통상부와 에너지관리공단에서 추진하고 있는 에너지소비효율등급표시제도와 같이 시행되고 있다.³⁶⁾ 여기서 에너지소비효율등급표시제도는 “제조·수입업자가 생산·수입 단계에서부터 원천

34) 절감전력 kW당 24만원씩 지급하였다(지식경제부, 2012a).

35) 에너지관리공단 보도자료 “고효율전동기 최저효율(MEPS) 세미나 개최 - 에너지절약 1조원 달성 프로젝트 본격 가동 (2005.11.30)”

36) 우리나라 효율관리제도에는 에너지소비효율등급표시제도 외에도 고효율에너지기자재인증제도, 대기전력저감프로그램 제도, 고효율기기보급지원제도 등이 있다. 이 중에서 에너지소비효율등급표시제도는 현재 전동기를 포함해 35개 제품이 등록되어 있다. 등록제품으로는 가스온수기, 가정용가스보일러, 공기청정기, 김치냉장고, 멀티전기히트펌프시스템, 백열전구, 변압기, 삼상유도 전동기, 상업용 전기냉장고, 선풍기, 식기건조기, 식기세척기, 안정기내장형램프, 어댑터·충전기, 전기냉난방기, 전기냉동고, 전기냉방기, 전기냉온수기, 전기냉장고, 전기드럼세탁기, 전기라디에이터, 전기밥솥, 전기세탁기, 전기스토브, 전기온수매트, 전기온풍기, 전기장판, 전기진공청소기, 전기침대, 전열보드, 제습기, 창 세트, 텔레비전수상기, 형광램프, 형광램프용 안정기가 포함된다. 그리고 각 품목별로 최저소비효율기준과 소비효율등급부여기준을 제시하고 있는데, 삼상유도 전동기를 포함해 형광램프용안정기, 어댑터·충전기, 변압기, 전기온풍기, 전기스토브, 전기장판, 전기온수매트, 전열보드, 전기침대, 전기라디에이터는 최저소비효율기준만을 적용한다(효율관리기자재 운용규정, 지식경제부고시 제2012-227호, 2012.10.5).

적으로 에너지절약형 제품을 생산하고 판매비자들이 이를 쉽게 구입할 수 있도록 하기 위한 의무 신고제도”이다. 이를 통해 에너지 소비 효율이나 에너지 사용량에 따른 등급을 표시하도록 하고 있으며, 그에 따른 최저소비효율기준도 적용하고 있어서 기준에 미달되는 제품은 생산과 판매를 금지하고 있다.³⁷⁾ 우리나라의 전동기 최저소비효율제도는 200kW 이하의 삼상유도 전동기에 대해서만 의무기준을 적용하고 있으며, 2007년 5월부터 2, 4, 6극,³⁸⁾ 2009년 12월부터 8극,³⁹⁾ 2011년 11월부터 프리미엄 전동기에 대한 기준을 도입하였다.⁴⁰⁾ 다음 <표 9>, <표 10>은 각각 우리나라 삼상유도 전동기의 최저소비효율제도 시행시기와 효율 기준을 나타낸 것이다.

<표 9> 우리나라 삼상유도 전동기의 최저소비효율기준 적용시기

종류	용량 (kW)	시행시기	근거
2,4,6극	37~200	2008년 7월 1일	부칙(제2007-70호) 2007.05.25
	15 ~ 37	2010년 1월 1일	
	0.75 ~ 15	2010년 7월 1일	
8극	37~110	2010년 1월 1일	부칙(제2009-158호) 2009. 7. 30
	0.75~ 37	2011년 1월 1일	

자료: 효율관리기자재운용기준(지식경제부고시 제2012-227호) 재구성

37) 에너지관리공단 효율관리제도 홈페이지

http://bpms.kemco.or.kr/efficiency_system/

38) 효율관리기자재의 운영에 관한 규정(산업자원부고시 제2007-70호, 2007.5.25 일 부개정)

39) 효율관리기자재 운영규정(지식경제부고시 제2009-304호, 2009.12.11, 전부개정)

40) 효율관리기자재 운영규정(지식경제부고시 제2011-241호, 2011.11.21, 일부개정)

<표 10> 우리나라 삼상유도 전동기의 최저소비효율기준

(단위: %)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	75.5	82.5	80.0	74.0	75.5	82.5	80.0	74.0
1.5	84.0	84.0	85.5	85.5	84.0	84.0	86.5	82.5
2.2	84.0	86.5	86.5	86.5	85.5	87.5	87.5	84.0
3.7	85.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	85.5
5.5	87.5	88.5	88.5	88.5	88.5	89.5	89.5	85.5
7.5	88.5	89.5	90.2	89.5	89.5	89.5	89.5	88.5
11	89.5	91.0	90.2	89.5	90.2	91.0	90.2	88.5
15	90.2	91.0	91.0	90.2	90.2	91.0	90.2	89.5
18.5	91.0	91.7	91.7	90.2	91.0	92.4	91.7	89.5
22	91.0	92.4	92.4	91.0	91.0	92.4	91.7	91.0
30	91.7	93.0	93.0	91.0	91.7	93.0	93.0	91.0
37	92.4	93.0	93.0	91.7	92.4	93.0	93.0	91.7
45	93.0	93.6	93.6	92.4	93.0	93.6	93.6	91.7
55	93.0	94.1	93.6	93.6	93.0	94.1	93.6	93.0
75	93.0	94.1	94.1	93.6	93.6	94.5	94.1	93.0
90	93.6	94.5	94.1	93.6	94.5	94.5	94.1	93.6
110	93.6	95.0	94.5	93.6	94.5	95.0	95.0	93.6
132	93.6	95.0	94.5	94.1	94.5	95.0	95.0	94.1
160	94.5	95.0	94.5	94.1	95.0	95.0	95.0	94.1
200	94.5	95.0	94.5	94.1	95.0	95.0	95.0	94.1

주: 1. 보호형과 전폐형은 전동기의 외피 구조를 의미하며, 보호형은 외부에서 이물질이 들어가지 못하게 일부 보호된 것이고, 전폐형은 완전 밀폐된 구조임.

2. 비표준 삼상유도 전동기에 대한 적용기준은 정격 출력이 규정된 값 사이에 있을 경우 중간 또는 그 이상이면 위쪽의 높은 정격출력의 최저소비효율기준을 따르고, 중간 미만이면 아래쪽의 낮은 정격출력 최저소비효율기준을 따름.

출처: 효율관리기자재운용기준(지식경제부고시 제2012-227호, 2012. 10. 5) 별표 3
최저소비효율기준 및 소비효율등급 부여기준

한편, 최저소비효율기준과 같은 의무규정은 아니지만, 효율관리기자재운용 기준에서는 일정한 효율기준을 통과한 삼상유도 전동기에 대해 프리미엄 기준을 두고 있으며, 2012년 4월부터 프리미엄급 효율 기준을 적용하였고 2015년부터는 프리미엄 전동기의 생산·판매를 의무화하였다.⁴¹⁾ 프리미엄 전동기의 효율기준은 <표 11>과 같다.

41) 지식경제부 에너지절약추진단 보도자료, “생활밀착형 에너지 효율향상 종합대 생활밀착형 에너지 효율향상 종합대책 (2012.03.08)”

<표 11> 우리나라 삼상유도 전동기의 프리미엄 효율기준

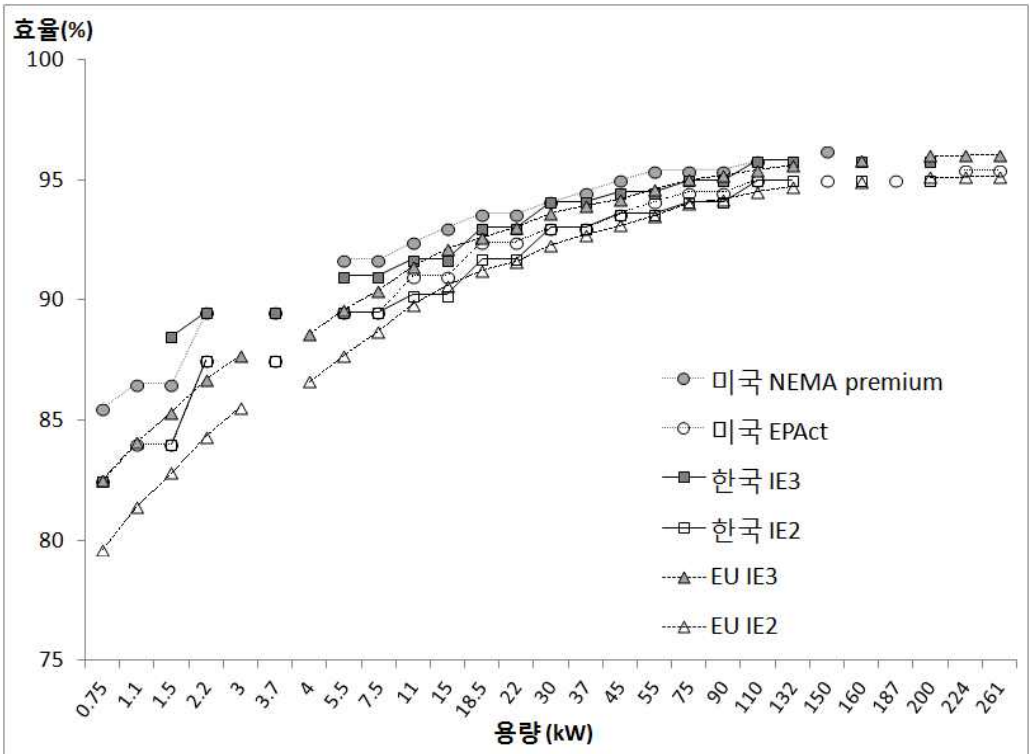
(단위: %)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	77.0	85.5	82.5	-	77.0	85.5	82.5	75.5
1.5	85.5	86.5	87.5	-	85.5	86.5	88.5	84.0
2.2	85.5	89.5	88.5	-	86.5	89.5	89.5	85.5
3.7	86.5	89.5	89.5	-	88.5	89.5	89.5	86.5
5.5	88.5	91.0	90.2	-	89.5	91.7	91.0	86.5
7.5	89.5	91.7	91.7	-	90.2	91.7	91.0	89.5
11	90.2	93.0	91.7	-	91.0	92.4	91.7	89.5
15	91.0	93.0	92.4	-	91.0	93.0	91.7	90.2
18.5	91.7	93.6	93.0	-	91.7	93.6	93.0	90.2
22	91.7	94.1	93.6	-	91.7	93.6	93.0	91.7
30	92.4	94.1	94.1	-	92.4	94.1	94.1	91.7
37	93.0	94.5	94.1	-	93.0	94.5	94.1	92.4
45	93.6	95.0	94.5	-	93.6	95.0	94.5	92.4
55	93.6	95.0	94.5	-	93.6	95.4	94.5	93.6
75	93.6	95.4	95.0	-	94.1	95.4	95.0	93.6
90	94.1	95.4	95.0	-	95.0	95.4	95.0	94.1
110	94.1	95.8	95.4	-	95.0	95.8	95.8	94.1
132	94.5	95.8	95.4	-	95.4	95.8	95.8	94.5
160	95.0	95.8	95.4	-	95.4	96.2	95.8	94.5
200	95.0	95.8	95.4	-	95.8	96.2	95.8	94.5

출처: 효율관리기자재운용기준(지식경제부고시 제2012-227호, 2012. 10. 5) 별표 3
최저소비효율기준 및 소비효율등급 부여기준

다음 <그림 11>은 우리나라와 미국, EU의 전동기 효율등급별 최저소비효율기준을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 한국의 기준은 미국이나 EU와 거

의 비슷한 수준으로 전동기의 효율적 이용에 많은 기여를 할 것으로 보인다.



자료: 한국 자료는 효율관리기자재운용기준(지식경제부고시 제2012-227호,2012.10.5) 별표3의 최저소비효율기준 및 소비효율등급 부여기준, 미국 자료는 NEMA Premium Efficiency 및 EPAct Efficiency 기준, EU 자료는 IE2, IE3 기준을 바탕으로 재구성

<그림 11> 한국, 미국, EU의 용량별 최저소비효율제 기준

앞서 기술한대로, 우리나라의 최저소비효율제도는 200kW 이하의 삼상유도 전동기에 대해서만 적용되고 있다. 이는 현재 우리나라에 있는 200kW이상 대용량 전동기가 소비하는 전력 비중이 그리 크지 않기 때문에 우선적으로 200kW에 대해서 적용한 것이다.⁴²⁾ 그러나 이들 대용량 전동기들이 대당 소비하는 전력은 상당히 크고 미국과 EU에서도 예외 없이 적용하고 있다는 점에

42) 이 논문에서 추정된 결과, 제조업 전동기 전력 소비 중 150~370kW 삼상유도 전동기가 차지하는 비중은 3.7%이고, 370kW 이상은 9.7%이다.

서 이들에 대한 최저소비효율제도 확대 적용도 향후 검토할 필요가 있다. 사실 우리나라 정부는 이미 2012년 초 최저소비효율 기준을 그해 말부터 385kW까지 확대한다고 발표한 바 있었으나,⁴³⁾ 아직까지 시행은 되고 있지 않다. 미국과 EU에서 대용량 전동기에 대해 적용하고 있는 최저소비효율기준은 다음 <표 12>와 같다.

<표 12> 미국과 EU의 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율기준

국가	용량	최저소비 효율기준	비고
미국	300~450HP (224~336kW)	95.4%	201~500HP 전동기에 대해 EPA 92 기준을 적용
	500HP (373kW)	95.8%	
EU	200~375kW	95.1%	IE3의 경우 96%

주: 미국은 전폐형 4극 기준, EU는 50Hz 4극 기준임.

3) 국내 전동기 관련 실태 조사와 자료구축 현황

우리나라에서 전동기 기술 및 보급통계에 관한 실태 조사는 그동안 몇 차례 수행된 적이 있다. 산업자원부(2002)는 산업용 전동기의 보급실태에 관한 조사를 했었는데, 전동기 제조업체의 판매량 신고 자료를 바탕으로 개략적으로 이루어진 수준이었다(지식경제부, 2008a). 에너지관리공단(2004)에서는 전동기 보급대수와 기술특성에 대한 신규조사를 실시하였으며, 산업자원부(2002)와 생산업체 자료 및 전문가의견을 바탕으로 보급대수를 추정하였다. 지식경제부(2008)에서는 전동기를 사용하는 산업체와 건물을 대상으로 샘플링 조사를 통해 업종별, 용량별, 용도별 보급대수, 부하율, 가동률 등을 조사하였고,⁴⁴⁾

43) 지식경제부 에너지절약추진단 보도자료. “생활밀착형 에너지 효율향상 종합대 생활밀착형 에너지 효율향상 종합대책(2012.03.08)”

44) 산업체의 경우, 110,587개의 모집단에서 763개 업체(0.69%)를 표본으로 해서 이

에너지관리공단(2009)은 전동기 기술 특성에 대한 조사를 추가하였다. 이들을 간단히 정리하면 다음 <표 13>과 같다.

<표 13> 국내 전동기 관련 실태조사의 조사항목

조사	보급대수 · 보급용량 조사	기술특성 조사
에너지관리공단(2004)	O	O
지식경제부(2008a)	O	×
에너지관리공단(2009)	지식경제부(2008a) 자료 활용	O

전동기가 전력 소비에서 차지하는 중요성에도 불구하고, 국내에서 시행되었던 전동기 실태 조사 수준은 상당히 미약한 수준이었다. 짧은 조사 기간과 적은 예산으로 인해 정기적인 조사도 이루어지지 못했고 대략적인 수준의 조사만 진행되었다.⁴⁵⁾ 전동기는 업종별 · 용도별 · 종류별 · 용량별로 이용되는 전동기 특성이 달라서 그에 따른 세분화된 기술 특성 DB나 통계 구축이 이루어져야 하고, 그것을 바탕으로 한 정교한 분석이나 정책 설계가 가능하다. 선진국에서는 IMSSA와 같은 프로그램을 통해 시장에 나와 있는 전동기에 대한 상세하고 방대한 자료를 구축하여 국가 간에 공유하고 소비자들에게도 무료로 제공하고 있는 수준에 있다. 그리고 미국에서는 DOE(2002)에서처럼 산업용 전동기에 대해 업종별 · 용도별 · 종류별 · 용량별로 상세한 전동기 통계도 구축하여 관리하고 있다. 우리나라에서도 실효성 있는 수요관리가 이루어지면 전동기에 대한 체계적이고 세분화되고 정기적인 기술조사와 자료 구축이 반드시 필요하다.

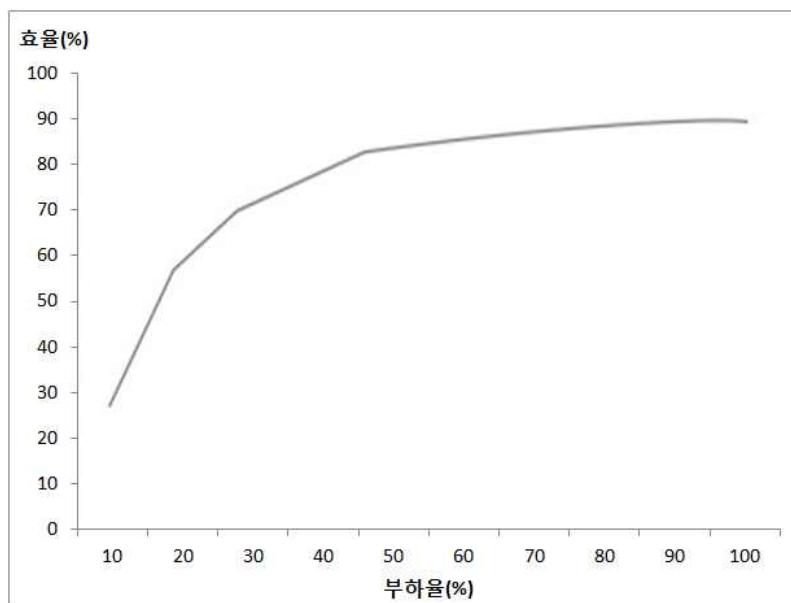
메일, 전화, 방문조사를 실시하였다(지식경제부, 2008a).

45) 전동기 보급 통계를 조사했던 지식경제부(2008a)는 5개월간 8천만원에 불과했다.

3. 전동기의 부하율과 인버터

1) 전동기의 부하율

전동기의 부하율(Load factor)은 전동기의 정격용량 대비 평균 부하를 의미한다. 전동기의 전력 소비에서 부하율이 중요한 이유는 부하율이 낮아지게 되면 전동기의 효율도 낮아지게 되기 때문이다. 다음 <그림 12>는 부하율에 따른 전동기 효율을 개략적으로 나타낸 것이다.



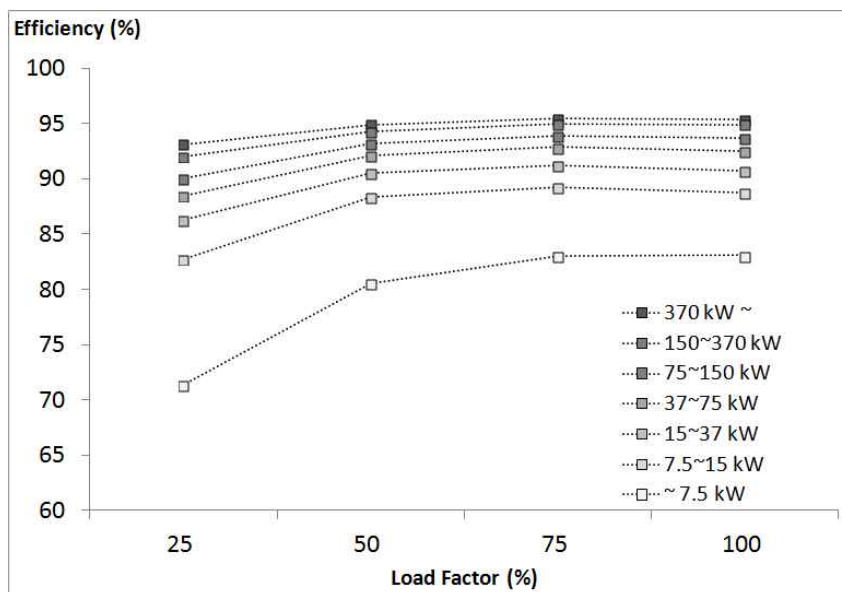
출처: Beggs(2009)

<그림 12> 전동기 부하율과 효율과의 관계

전동기 부하율과 효율 간의 관계는 부하율이 75~100%에서는 효율이 크게 차이나지 않으며, 부하율 75~80%일 때 효율이 가장 높다(CEE, 2011). 그러나 부하율이 50%이하가 되면 효율이 상당히 낮아지게 되며(Beggs, 2009), 용량이 클수록 효율이 급격히 저하되는 부하율 시점도 더 작아지게 된다(Natural Resources Canada, 2003). 따라서 전력 소비를 줄이기 위해서는 최

고 효율을 얻을 수 있는 전동기 부하율을 맞춰서 이용하는 것이 필요하다. 그러나 미국에서 사용하는 산업용 전동기의 40% 이상이 부하율 40% 이하라는 결과도 있을 만큼(DOE, 2002), 전동기의 부하율을 낮은 상태로 운용하는 경우가 많다.

전동기의 부하율과 효율에 관한 보다 정확한 관계를 알기 위해 이 논문에서는 IMSSA(International Motor Selection and Saving Analysis) 데이터를 활용해 둘 간의 그래프를 도출하였다. <그림 13>은 IMSSA에 있는 전동기 데이터를 바탕으로 전동기 용량별로 부하율에 따른 효율수준을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 부하율이 75% 이하가 되면 효율이 조금씩 감소하고 25%일 경우는 좀 더 많이 감소한다. 그림에서는 잘 드러나지 않으나, 7.5kW 이하 전동기를 제외하고 모든 용량 전동기에서 부하율 75%일 때 전동기 효율이 가장 높았다.



자료: IMSSA에 있는 전동기 데이터를 바탕으로 구성

<그림 13> 전동기 용량별 부하율과 효율과의 관계

전동기의 부하율을 낮게 운용하는 것은 전동기 선택 시 실제 필요한 용량을 고려해 선택하기보다 필요 이상으로 큰 것을 선택하거나 아예 필요 용량에 대

한 고려를 잘 하지 않기 때문이다. 다음 <표 14>는 미국에서 전동기 교체 시 크기 선택의 기준에 관한 설문조사 결과이다. 표에서 보듯이, 교체할 전동기의 크기를 보고 선택하는 정도가 가장 많았으며, 응답자의 86%가 항상 혹은 대부분 그렇게 하는 것으로 나타났다. 반면, 전동기의 부하를 고려해 크기를 선택하는 정도는 높지 않아 10% 정도만이 항상 혹은 대부분 그렇게 한다고 응답하였다. 그리고 표에서는 나오지 않았으나, 다른 것은 고려하지 않고 교체할 전동기의 크기만 가지고 새 전동기의 크기를 결정하는 비율이 응답자의 29%나 되었다(DOE, 2002).

<표 14> 전동기 크기 선택 시 고려하는 기준에 대한 응답 결과

(단위: %)

	항상 그렇다	대부분 그렇다	가끔 그렇다	전혀 안 그렇다	무응답	계
교체할 전동기와 똑같은 크기를 선택	55	31	4	0	11	100
재고품 중 교체할 전동기와 크기가 제일 비슷한 것을 사용	5	10	20	41	24	100
측정하거나 추정된 부하율을 근거로 선택	7	3	12	55	23	100
전동기 제품 설명서를 참고해 선택	24	20	8	25	23	100

주: 선택지에 대한 복수 응답이 가능하게 조사하였음

출처: DOE(2002)

이와 같이 불필요하게 큰 전동기 용량을 선택함(Oversizing)으로 인해 발생하는 효율 저하에 대한 문제 제기는 여러 선행 연구와 정책 자료에서 제기되어 왔다(녹색전력연구회, 2003; Beggs, 2009; Bortoni, 2009; DOE, 2008; Saidur, 2010). 물론 미래의 생산 규모 확장을 고려해 여유 있는 전동기 용량을 선택할 수도 있고, 부하율 향상이 전동기 수명 감소나 유지관리 비용 증가

를 야기할 수 있다. 문제는 이러한 상황들을 고려해 적정 수준의 전동기 용량을 판단하고 선택하는 것이 필요함에도 불구하고 전동기 선택시 이런 요소들을 제대로 고려하지 않고 있다는 것이다.

2) 인버터

인버터(inverter)는 교류 전동기⁴⁶⁾에서 직류를 교류로 전환시켜 전압과 주파수를 변화시킴으로써 전동기의 속도를 필요한 만큼 조절하는 장치이다.⁴⁷⁾ 인버터는 다른 표현으로 VSD(Variable Speed Drive), ASD(Adjustable Speed Drive), VFD(Variable Frequency Drive), AFD(Adjustable Frequency Drive), AC drive라고도 하고(Saidur, 2010) 혹은 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)라고도 한다. 인버터는 필요에 따라 전동기 속도를 조절함으로써 소비 전력을 줄여 주기 때문에 전동기의 효율 개선만큼이나 에너지 절감에 있어 중요한 장치이다. 다음 <표 15>는 전동기가 주로 쓰이는 용도인 펌프, 공기압축기, 팬에 대해 인버터의 전력 절감을 통한 효율 개선 효과⁴⁸⁾를 나타낸 것이다.

46) 예전에는 교류 삼상유도전동기에 대해 주로 적용되었으나, 최근에는 유도전동기, 영구자석 동기전동기 등 다양한 전동기에 대해 적용이 가능하다.

47) 교류 전동기가 교류전원을 직류 전원으로 바꾸게 되는데, 이것까지를 포함해서 인버터계통에 포함하고 있다(윤복래, 2009)

48) 실제 인버터가 전동기 효율을 개선하는 것은 아니며 전동기 전력 소모를 줄이는 것인데, 편의상 효율 증가로 환산해 적용한 것이다.

<표 15> 인버터의 효율 개선 효과

	효율 개선 (%)		
	저효율 기준 대비	중효율 기준 대비	고효율 기준 대비
펌프	25	15	10
공기압축기	20	15	5
팬	35	20	8

주: 1. 효율 % 개선 효과는 입력 전기사용량의 % 감소치를 의미함.

2. 저효율 기준, 중효율 기준, 고효율 기준은 다음과 같음.

 펌프: 저효율(20~40%), 중효율(40~60%), 고효율(60~75%)

 공기압축기: 저효율(2~5%), 중효율(4.8~8.0%), 고효율(8~13%)

 팬: 저효율(15~30%), 중효율(30~50%), 고효율(50~65%)

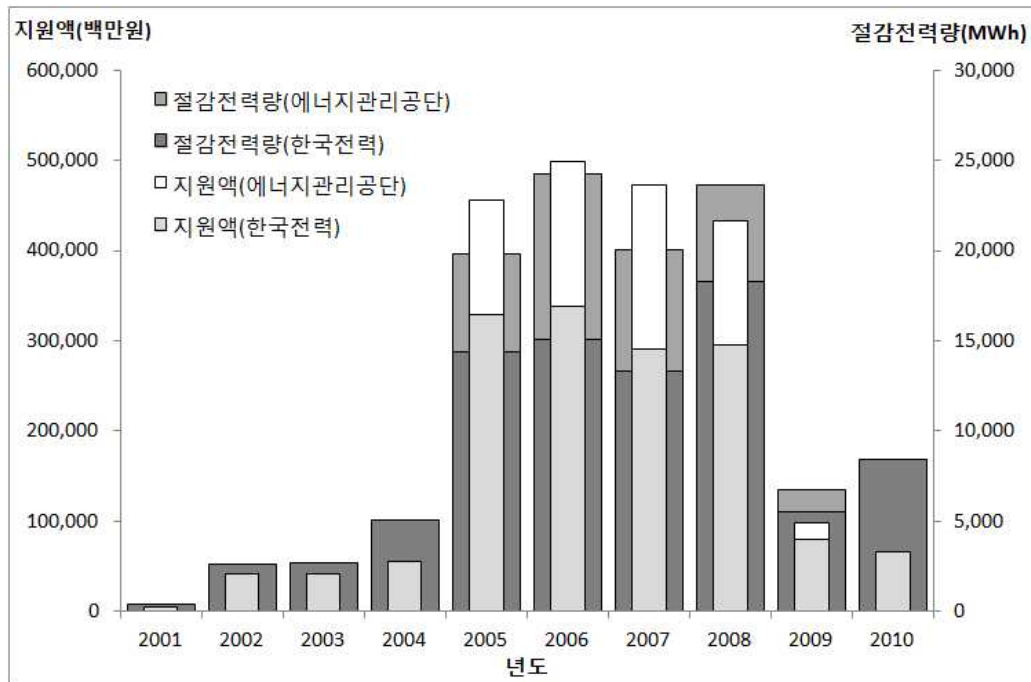
자료: UNIDO(2010) 자료 재구성

이런 전력 절감효과에도 불구하고, 우리나라의 전동기에 대한 인버터 설치율은 선진국에 비해 턱없이 낮은 편으로 알려져 있다.⁴⁹⁾ 그래서 정부에서는 인버터 설치율을 높이고자 여러 지원정책을 시행하여 왔는데, 2001년부터 한국전력공사에서 고효율 인버터에 대한 지원을 하고 있으며,⁵⁰⁾ 2005~2009년에는 에너지관리공단도 지원을 하였다(지식경제부, 2012a). 다음 <그림 14>는 2001~2010년 사이의 고효율 인버터에 대한 지원 내역과 절감전력량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 우리나라의 고효율 인버터에 대한 지원은 2005~2008년 사이에 상대적으로 꽤 높았으며, 이는 한국전력의 지원 폭이 크기도 했고, 2005~2009년 사이 에너지관리공단의 지원이 추가되기도 했기 때문이다. 그러나 다시 2009년부터 지원폭이 대폭 줄어들고 그에 따라 전력감축량

49) 인버터 설치율에 대한 정확한 통계는 구축되어 있지 않은데, 선진국은 대략 20% 수준이고 우리나라는 1~7% 정도로 추정되고 있다(윤복래, 2009; 한국과학기술정보연구원, 2009; 에너지경제 “대표적인 고효율기기 명암 ‘극과 극’ - 고효율인버터 활짝, 삼상유도전동기 우울(2013.09.11)).

50) 고효율기기 장려금 지원 대상에는 고효율 인버터 말고도 고효율 조명기기, 고효율 변압기, 고효율 냉동기가 포함된다. 고효율 전동기에 대한 지원은 2009년에 폐지되었다.

실적도 많이 줄었다.



자료: 지식경제부(2012a) 재구성

<그림 14> 우리나라 고효율 인버터 지원금 추이와 절감전력량 추이

이렇게 지원금이 줄어든 이유 중 하나가 절감전력당(kW)당 지원금액의 축소 때문이다. 초기에는 절감전력(kW)당 198,000원에서 최고 240,000원까지도 인상되었으나, 이후 점차 축소되어 190,000원, 150,000원을 거쳐 현재는 다음 <표 16>과 같이 평균 중소기업 76,000원, 대기업 91,000원까지 축소되었다(지식경제부, 2012a).⁵¹⁾ 그러나 전력 수요관리에서 전동기의 효율적 운용이 가지는 중요성을 고려해볼 때 고효율 인버터 설치가 상당히 중요하고, 그런 측면

51) 고효율 인버터 지원금에 대한 예산을 너무 적게 책정한 탓에 지원자가 몰리면서 예산부족으로 2009년에는 지원 중단 사태가 벌어지기도 했다(출처: 한국전력공사 고효율기기 장려금 홈페이지 <http://www.kemco.or.kr/rebate/>). 그러다가 2013년에는 지원금 총액이 80억으로 대폭 증가했다(출처: 에너지경제 “대표적인 고효율기기 명암 ‘극과 극’ - 고효율인버터 활짝, 삼상유도전동기 우울 (2013.09.11)).

에서 고효율 인버터에 대한 지속적이고 강화된 지원정책이 필요하다.

<표 16> 국내 고효율 인버터 지원금

용량	절감전력(kW)	지원금(천 원)	
		대기업	중소기업
3.7	1.3	107	126
5.5	1.9	159	187
7.5	2.6	217	255
11	3.7	318	374
15	5.1	434	510
18.5	6.3	535	629
22	7.5	636	748
30	10.2	765	918
37	12.6	944	1,132
45	15.3	1,148	1,377
55	18.7	1,403	1,683
75	25.5	1,913	2,295
90	30.6	1,989	2,448
100	37.4	2,431	2,992
132	44.9	2,917	3,590
160	54.4	3,536	4,352
200	68.0	4,420	5,440

주: 3.7~220kW 용량의 팬, 펌프, 블로어 같은 에너지절감 가능 부하에 「고효율 에너지 기자재」로 인증된 인버터를 설치하여 절감되는 전력합계가 5kW일 경우에 해당됨.

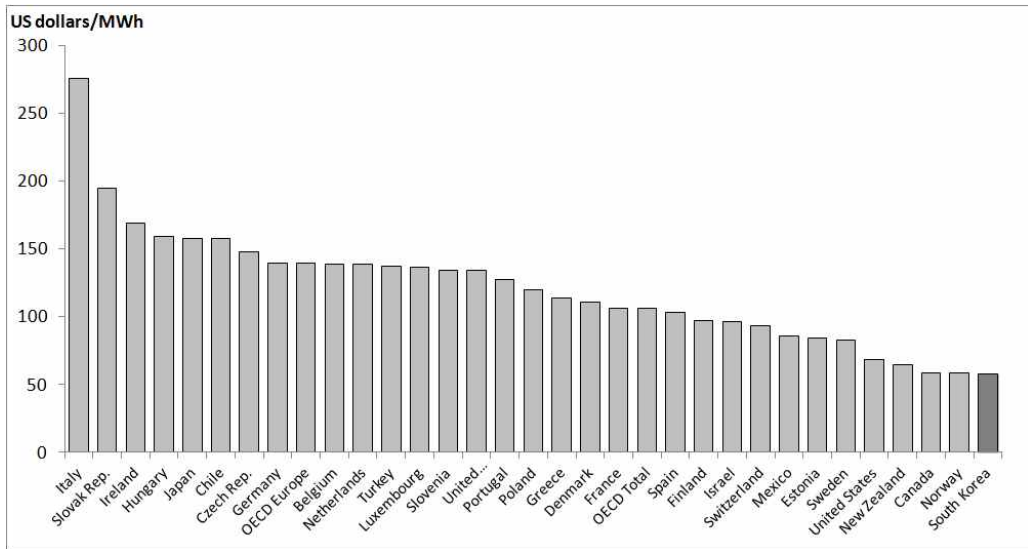
출처: 한국전력공사(2011)

4. 산업부문 전기 요금

우리나라 산업용 전기요금⁵²⁾은 다른 선진국과 비교하거나, 다른 화석연료 가격과 비교하거나, 다른 용도별 요금에 비교할 때 상당히 저렴한 편이다. 다음 <그림 15>와 <그림 16>에서 보듯이 우리나라의 산업용 전기요금은 OECD 국가들 중에서 매우 낮다. 먼저 OECD 국가들과 비교하면, 구매력평가지수(Purchasing Power Parity; PPP)를 고려하지 않았을 때는 OECD 국가 중 가장 낮고, 구매력평가지수를 고려하더라도 10위로 비교적 낮은 국가군에 속한다.⁵³⁾

52) 우리나라의 전력시장은 수요와 공급에 의해 가격이 결정되는 것이 아니라 정부 정책에 따라 통제된 요금체계를 가지고 있기 때문에 ‘전기가격’이라는 표현보다 ‘전기요금’이라고 표현한다(김수덕, 2009).

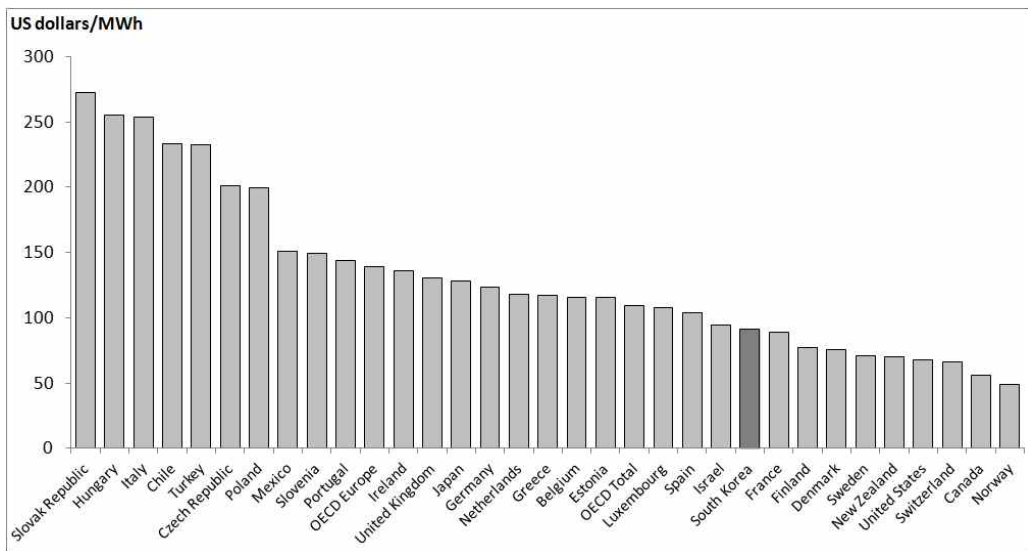
53) 국가 간 전기요금을 비교할 때 구매력 지수(Purchasing Power Parities; PPP)를 적용하기도 하고, 적용하지 않기도 한다. 대개 국가 간 특정 비용을 비교할 때는 구매력지수 같은 것을 활용해 각국의 소득이나 물가수준 같은 구매력을 고려하여 비교를 한다. 이 때문에 여러 국내 연구에서는 구매력지수를 반영하여 국가 간 전기요금을 비교하였다(이윤경, 2008; 정한경 외, 2007). 그러나 일각에서는 발전 원료나 발전 설비를 해외에서 수입하는 경우가 많기 때문에 국가별 전기요금이 자국의 구매력 수준보다는 국제적으로 형성된 발전원료나 설비 가격에 많은 영향을 받게 되고, 전기요금에서 구매력지수를 반영하는 것이 큰 의미가 없다는 주장도 있다(산업자원부, 2005). 그래서 구매력지수를 고려한 것과 하지 않는 두 가지를 모두 비교하기도 하고, 발전연료 대비 전기요금을 비교하기도 한다(이윤경, 2008). 이 논문에서는 구매력지수를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 그리고 화석연료 대비 전기요금을 모두 비교하였다.



주: Australia, Austria는 수치가 보고되지 않아 제외

자료: IEA(2013) 재구성

<그림 15> OECD 국가 명목 산업용 전기요금 (2009년 기준, 구매력지수 미고려)

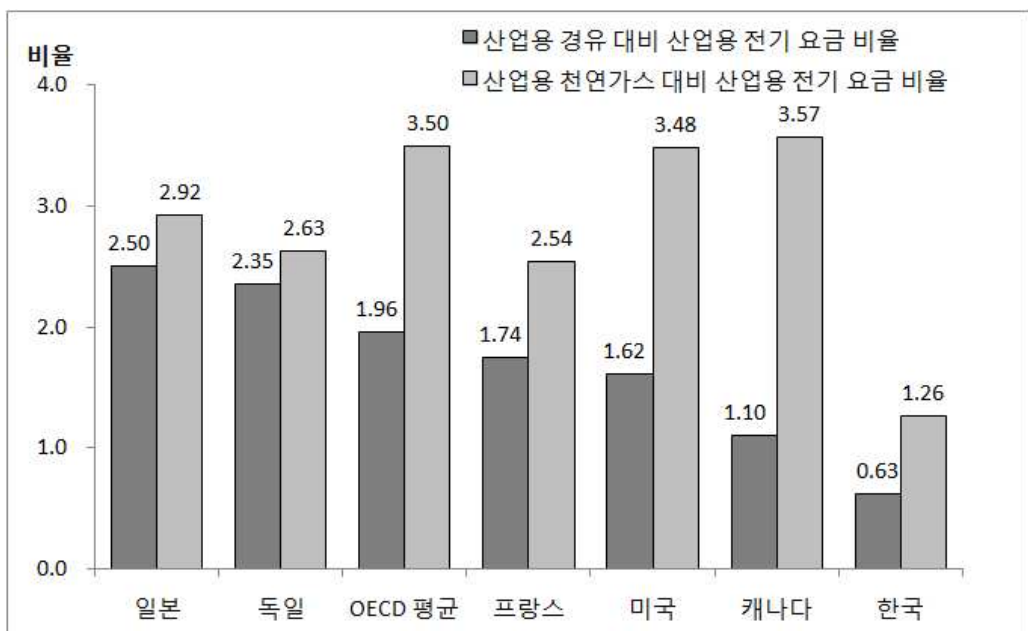


주: Australia, Austria는 수치가 보고되지 않아 제외

자료: IEA(2013) 재구성

<그림 16> OECD 국가 명목 산업용 전기요금 (2009년 기준, 구매력 고려)

또 전기요금을 화석연료 가격 대비 상대적 비율로 환산해 보면 우리나라 산업용 전기요금이 다른 선진국에 비해 훨씬 싸다는 것이 드러난다. 다음 <그림 17>은 우리나라를 비롯해 미국, 일본, 독일, 프랑스, 캐나다, OECD 평균의 산업부문 경유, 천연가스 요금 대비 전기요금의 상대적 비율을 나타낸 것이다. 우리나라는 산업부문 천연가스요금 대비 전기요금 비율에서 다른 선진국 및 OECD 평균에 비해 낮게 나타나며, 산업용 경유요금 대비 산업용 전기요금의 비율은 0.63으로 1보다 낮다. 이는 전기요금이 경유요금보다 더 싸다는 것으로 전기요금의 역전현상이라 한다. 이러한 전기요금의 역전현상은 에너지의 전력화(electrification) 현상을 가중시켜 전력 수급의 불안정을 심화시키고, 에너지 효율을 저하시키며, 발전 및 송전시설 확대로 인한 사회적 갈등을 증가시키기도 한다는 점에서 심각한 문제이다(석광훈, 2012; 조영탁, 2012).



주: 1. 2009년도 자료임.

2. 각 에너지별 TOE당 US달러 비용을 바탕으로 계산하였음.

3. 우리나라는 OECD 국가에서 전기요금의 상대적 비율이 제일 낮음.

자료: IEA(2013) 재구성

<그림 17> 주요국의 산업용 경유·천연가스 요금 대비 산업용 전기 요금의 비율

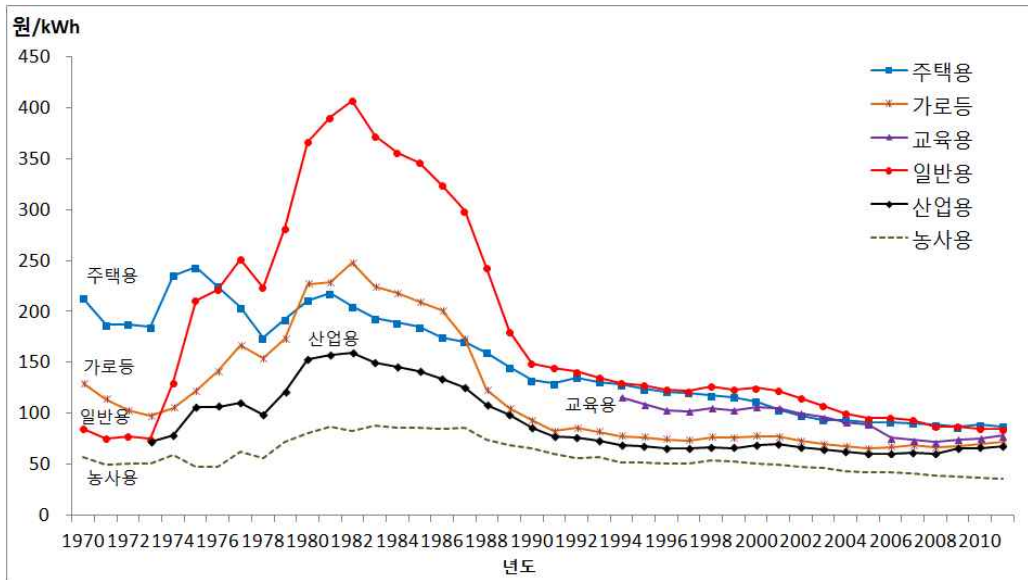
그동안 우리나라 전기요금은 명목상으로는 지속적으로 증가해왔으나, 물가인상을 고려해 실질요금으로는 환산해서 살펴보면 <그림 18>과 같이 1980년대 초를 기점으로 모든 용도별 요금이 하락해왔다.⁵⁴⁾ 그중에서도 산업용 요금은 농사용 요금 다음으로 낮은 전기요금 정책을 취해 왔다. 낮은 산업용 전기요금은 원가에도 못 미치는 낮은 수준으로⁵⁵⁾ 에너지 수요가 전기로 과도하게 몰리는 현상을 유발하여 전력수요 급증의 주원인으로 지적되어 왔으며(박광수, 2013; 이상훈, 2011; 정한경, 2011a), OECD에서는 한국의 낮은 전기요금이 일종의 보조금 역할을 함으로써 전력 소비와 온실가스 배출을 증가시키고 에너지집약적 산업구조를 고착화시킨다고 지적되었다(OECD, 2012). 이에 전기요금 현실화에 대한 논의가 지속적으로 진행되어 왔으며, 전기에 대한 과세확대가 경제적, 환경적으로 상당히 바람직하다는 주장과(김승래, 2013) 전력수요관리는 전기요금 인상 없이 불가능하다는 주장들이 제기되었다(윤순진, 2013).

54) 이렇게 전기요금이 낮아진 것은 원자력 발전을 통해 발전량이 급증한데다, 수요밀집도가 높고 발전용 연료에 대한 과세가 적으며, 산업용 비중이 높고 그로 인해 계통 부하율이 높아진 것 등이 원인 때문이다(정한경, 2011b).

55) 2011년 12월에 발표된 용도별 전기요금의 원가회수율(%)은 다음과 같다(2011.12.05 인상분 적용).

주택	일반			산업			교육	농사용	가로등	평균
	저압	고압	계	저압	고압	계				
86.4	90.3	99.3	94.9	81.4	95.2	94.4	87.7	32.8	83.4	90.9

(출처: 지식경제부 2011.12.02 보도자료 “올 겨울 전력수급 안정을 위해 12월 5일 전기요금 4.5% 인상”)



주: 실질요금은 소비자물가지수(전도시, 총지수)를 이용하여 산정하였음.

자료: 전력통계정보시스템(<https://epsis.kpx.or.kr/>) 재구성

<그림 18> 우리나라 용도별 전기요금의 실질요금 변화 추이

IV. MESSAGE 모형과 입력자료

1. MESSAGE 모형

1) 개요

이 논문에서는 우리나라 제조업 분야 전동기를 대상으로 최저소비효율제도 하에서 여러 감축방안이 추가 도입되었을 경우의 전력사용량을 분석하기 위해 MESSAGE 모형을 이용하였다. MESSAGE(Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impact) 모형은 상향식 최적화 에너지 시스템 분석 모형이다. 다시 말하면, MESSAGE 모형은 에너지를 이용하는 기술에 대한 상세한 자료를 바탕으로 선형계획법(Linear Programming)⁵⁶⁾을 이용해 환경적·정책적·기술적 제약 하에서 가장 비용효과적인 에너지 공급방안을 분석하는 모형이다. 그래서 에너지를 이용하는 최적의 기술 믹스를 전망하고 그에 따른 에너지 사용량이나 온실가스 배출량 등을 분석할 수 있고, 다양한 제약조건도 설정할 수 있다.

MESSAGE 모형은 1970년대 IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)에서 개발되었는데, 2008년 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 주도하에 새로운 버전(version 2.0)이 개발되었다. MESSAGE 모형은 에너지효율 기준이나 온실가스 감축목표, 탄소세, 신

56) 경영과학(Operation Research; OR)은 시스템의 운영, 관리, 계획, 설계에 관한 최적화 문제를 계량적, 체계적으로 분석하여 해결하는 학문인데, 선형계획법은 경영과학에서 가장 많이 쓰이는 방법이다. 선형계획법은 모형이 분명하고 해법이 잘 개발되어 있으며, 다루기 용이해서 특히 고려할 변수가 많은 대형 문제를 다룰 때 유용하다. 경영과학의 수리적 방법은 다음과 같은 조건을 만족해야 하는데, 선형계획법은 첫 번째, 두 번째 조건이 선형일 경우이다(박순달, 1992).

- ① 문제의 구조가 x_1, x_2, \dots, x_n 으로 표현됨.
- ② 경계조건이 $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ 으로 표현됨.
- ③ 구하려는 목표가 있으며, ①에 있는 변수로 표현됨.

기술 개발 등의 환경적, 정책적, 기술적 제약 설정이 가능하고 그에 따른 가장 비용효과적인 기술 믹스를 찾는 데 유용하기 때문에 주요 국가와 국제기구 및 연구소에서 에너지 및 온실가스 관련 분석에 많이 활용되어 왔다. IPCC 보고서의 온실가스 배출 시나리오(Special Report on Emission Scenarios; SRES)를 개발하는 핵심 모형 중 하나로 활용되었고, 우리나라에서 2011년도 부문별 업종별 온실가스 감축목표를 산정하는 기초자료로 활용되기도 했다.

MESSAGE 소프트웨어는 User interface를 비롯해 Database, MXG(Matrix Generation Program), OPTS(Optimization Program), CAP(program for the post processing of the solution for extracting results)로 구성된다(IAEA, 2007). MXG가 database를 가지고 matrix를 생성하면 OPTS에 있는 solver가 matrix를 바탕으로 'GLPK'를 이용해 방정식을 풀게 된다.⁵⁷⁾ 그러면 CAP에서 OPTS에 있는 solution 파일을 이용해 결과를 시각적으로 보여주게 된다.

MESSAGE는 독립적으로 쓰이기도 하지만, 다른 상향식 거시경제 모형이나 기후변화모형과 연결시켜 사용하기도 한다. 거시경제 모형인 MACRO(Macroeconomic model) 모형과 연결시켜 에너지 정책이 에너지 가격이나 에너지 수요, GDP 등에 미치는 영향을 분석하기도 한다(Rao et al., 2006). 혹은 기후변화 모형인 MAGICC(Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change) 등과 연결시켜 MESSAGE를 통해 도출된 온실가스 배출량이 대기 중 온실가스 농도와 주고받는 상호 영향을 분석하기도 한다(Grubb et al., 2002; Rao et al., 2006).

이 논문에서 MESSAGE 모형을 활용한 이유는 MESSAGE 모형이 상향식 모형이어서 전동기에 대한 상세 데이터에 근거한 정교한 전력 사용량 분석이 가능하고, 다양한 조건 설정이 가능해 전동기의 최저소비효율제도나 부하율 설정, 인버터에 의한 효율 개선, 전기요금 인상 등의 여러 상황을 반영한 모형 설계가 용이하기 때문이다. 또한 최적화 모형이기 때문에 단순한 시뮬레이션이 아니라 여러 정책, 기술 상황 하에서 가장 비용효과적인 기술 믹스를 분석

57) GLPK(GNU Linear Programming Kit)는 2000년에 GNU Project의 일환으로 Moscow Aviation Institute에서 개발한 소프트웨어로서 큰 사이즈의 선형계획(Linear programming, LP)문제와 혼합정수계획(Mixed integer programming, MIP)문제 등을 풀 수 있는 solver이다(출처: GNU Project 홈페이지 <http://www.gnu.org>)

할 수 있다는 강점이 있다. 그러나 대개의 상향식 모형이 그러하듯이 모형에서 이용하는 기술에 관한 상세하고 정확한 데이터가 요구된다는 점에서 데이터 확보가 중요하다.

2) 분석원리

MESSAGE 모형의 분석과정은 기준 에너지 시스템(Reference Energy System; RES)을 바탕으로 에너지 수요와 정책적·기술적 제약 상황 하에서 기술별 특성자료에 따라 최적해를 도출하는 과정으로 진행된다. 여기서 기준 에너지 시스템이란 에너지가 공급되고 전환과정을 거쳐 최종소비자에게 전달되어 유효에너지로 사용되는 일련의 네트워크 시스템을 말한다(온실가스종합정보센터, 2011b). MESSAGE의 분석공식을 단순화시켜 표현하면 <표 17>과 같다.

<표 17> MESSAGE 분석 공식

$$\min \sum_{t=0}^T \sum_{i=0}^n (C_i^t, x_i^t)$$

$$B_t x^t \geq d^t, \quad t=0,1,\dots,T$$

$$\sum_{t=0}^T A_t x^t \leq r$$

$$\sum_{k=0}^t P_k x^k \leq e^t, \quad t=0,1,\dots,T$$

$$0 \leq x^t \leq \overline{x^t}, \quad t=0,1,\dots,T$$

s.t. $t=(0,1,\dots,T)$: 시점

$C^t=(C_0^t,\dots,C_n^t)$: 시점 t 에 대한 비용 벡터

$r=(r_1,\dots,r_m)$: 총 자원 벡터

$e^t=(e_1^t,\dots,e_t^t)$: 다른 외부 RHS 벡터, 예) 기준년도에 존재하는 용량

$d^t=(d_1^t,\dots,d_e^t)$: 에너지 밸런스 e 에 대한 시점 t 에서의 에너지 수요

x^t : 시점 t 에 대한 활동변수

A_t : 시점 t 에 대한 어느 한 자원의 총량

B_t : 기술의 투입/산출 계수 매트릭스

P_k : 기간 간의 관계를 알려주는 매트릭스 예) 용량 제약

자료: Messner et al.(1996) 재구성

보다 구체적으로는 수명과 초기투자비용, 유지관리비용, 부하율, 연료비용, 효율을 바탕으로 균등화 비용(levelized cost)을 산정하고 이를 상호 비교하여 가장 저렴한 기술을 선택함으로써 최적화를 진행하게 된다. MESSAGE 모형에서 기술 선택 시 이용되는 균등화 비용은 다음 <표 18>에 의해 산정된다.

<표 18> MESSAGE 모형에서의 균등화 비용 공식

$$levelized\ cost = \frac{ccap + \frac{dr(1+dr)^r}{(1+dr)^r - 1} + cfix}{\pi} + ccur + \frac{cfuel}{effi}$$

$ccap$: 총 output 당 투자비용

$cfix$: 총 output 당 고정 유지관리비용

$ccur$: 총 output 당 연료비를 제외한 변동유지관리비용

$cfuel$: 연료의 가격

$effi$: 기술의 효율

dr : 할인율

r : 기술의 수명

π : 부하율

자료: Messner and Strubegger(1995)를 바탕으로 수정함.

3) MESSAGE를 이용한 선행연구

Kiani et al.(2013)은 MESSAGE를 이용하여 캐나다 지역의 한 주를 대상으로 향후 수력과 화력발전의 상황변화에 따른 발전량과 그에 따른 전력 수입량을 전망하였다. 그리고 Selvakkumaran and Limmeechokchai(2013)에서는 아시아 3국을 대상으로 2030년까지 에너지효율개선을 통한 에너지 감축잠재량을 분석하고 그에 따른 에너지 안보개선 정도를 측정하였으며, Hainoun et al.(2010)은 시리아의 전 부문을 대상으로 2030년까지의 에너지 감축잠재량과 그에 따른 에너지원 구성을 분석하였다.

또한 MESSAGE를 다른 하향식 거시경제 모형이나 기후 모형과 연결시켜 분석하는 경우도 있었다. Howells et al.(2010)은 MESSAGE 모형과 투입산출(Input Output; IO) 모형을 결합하여 발전부문에서 LNG를 원자력으로 대체하였을 때 온실가스 배출 반등효과를 추정하였다. Rao et al.(2006)은

MESSAGE 모형을 기후변화 모형인 MAGICC와 결합하여 전 세계를 대상으로 학습을 통한 기술 진보와 기술 파급이 전 세계 온실가스 농도 및 저감에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 IIASA(2003)에서는 MESSAGE와 MACRO, MAGICC를 결합하여 분석을 했는데, MESSAGE를 통해 온실가스 배출 제약에 따른 에너지 시스템 경로를 분석하고 MACRO를 통해 온실가스 감축정책에 따른 경제적 영향과 에너지 수요의 변화를 분석하였으며 MAGICC를 이용하여 CO₂ 농도와 기온변화, 해수면 상승 수준을 분석하였다. 이처럼 MESSAGE는 최적화 모형의 특성을 이용하면서 경제 모형이나 기후변화 모형과도 함께 쓰인다.

국내에서는 온실가스종합정보센터(2011a)에서 MESSAGE 모형을 이용해 2020년까지 산업, 발전, 수송부문의 에너지·온실가스 감축잠재량을 산정하였다. 최범선 외(2009)는 MESSAGE 모형을 이용해 우리나라 온실가스 배출 제약과 탄소배출권 거래 가격 증가에 따른 전원구성의 변화를 전망하였고, 김현석(2006)은 우리나라 발전부문과 시멘트 업종을 대상으로 MESSAGE 모형과 MARKAL 모형을 이용해 기술의 학습효과를 고려해서 온실가스 감축 잠재량을 비교분석하였다.

2. 주요 전제 및 입력자료

이 논문에서 사용한 MESSAGE 모형은 기준 에너지 시스템(Reference Energy System; RES)을 바탕으로 크게 전제 조건과 함께 에너지·기술·수요에 대한 입력자료로 구성된다. 전제조건에는 분석기간, 기준년도, 할인율 등이 포함되며, 에너지는 여기서는 산업용 전기요금 전망자료이다. 수요에는 미래 전동기의 동력 서비스 전망자료가 필요하며, 기술은 수요를 충족시킬 수 있는 여러 전동기 기술들의 특성자료, 즉 수명, 효율, 비용, 가동률, 부하율, 과거 보급용량, 신기술 도입시기 등이 포함된다.

1) 전제조건

전제조건으로서 이 논문에서 분석의 기준년도는 2010년으로 하였으며, 신기술 전동기의 특성치의 불확실성을 고려해 2030년까지 분석을 실시하였다. 화폐가치는 2005년도 실질 가치로 나타내었고,⁵⁸⁾ 할인율은 5.0%를 적용하였다. 그리고 본 분석은 제조업 전체를 대상으로 하되, 보다 정확하고 세분화된 분석이 요구되고 데이터가 가용한 경우 업종별 구분 자료를 활용하여 분석하였다.⁵⁹⁾

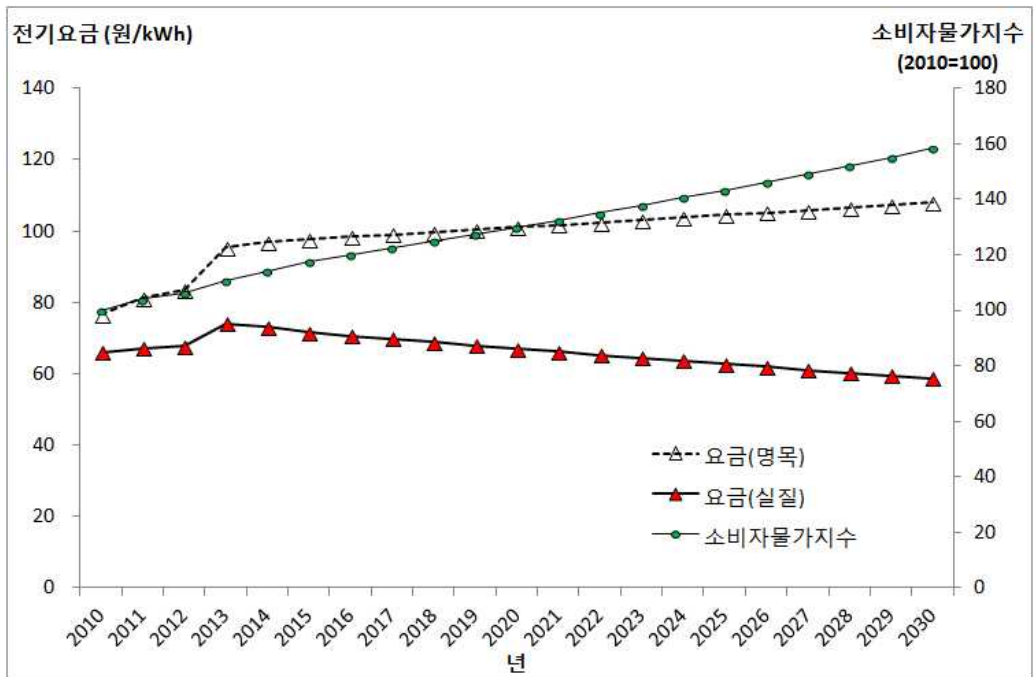
2) 산업용 전력 요금 전망 자료

우리나라에서는 전력요금이 정부 정책에 의해 결정되므로 산업용 전기요금

58) 2005년 실질가치로의 환산은 GDP deflator를 이용하였으며, 미국 달러는 한국은행의 해당 연도의 환율을 적용하여 환산하였다(2010년의 경우, 1US\$=1,156.86원 적용).

59) 제조업의 업종 구분은 식료품(음식료품, 담배), 섬유(섬유·의복·가죽), 목재·종이·인쇄, 석유·화학(석유, 석탄 및 화학제품), 비금속, 1차금속(철강, 비철금속), 기계·장비(일반기계, 전기및전자기기, 정밀기기, 운송장비), 기타(가구 및 기타제품)와 같이 8가지로 하였다.

전망은 6차 전력수급기본계획 기준수요 설정 시 전제했던 전망치를 BAU 시나리오로 반영하였고, 다음 <그림 19>와 같다.



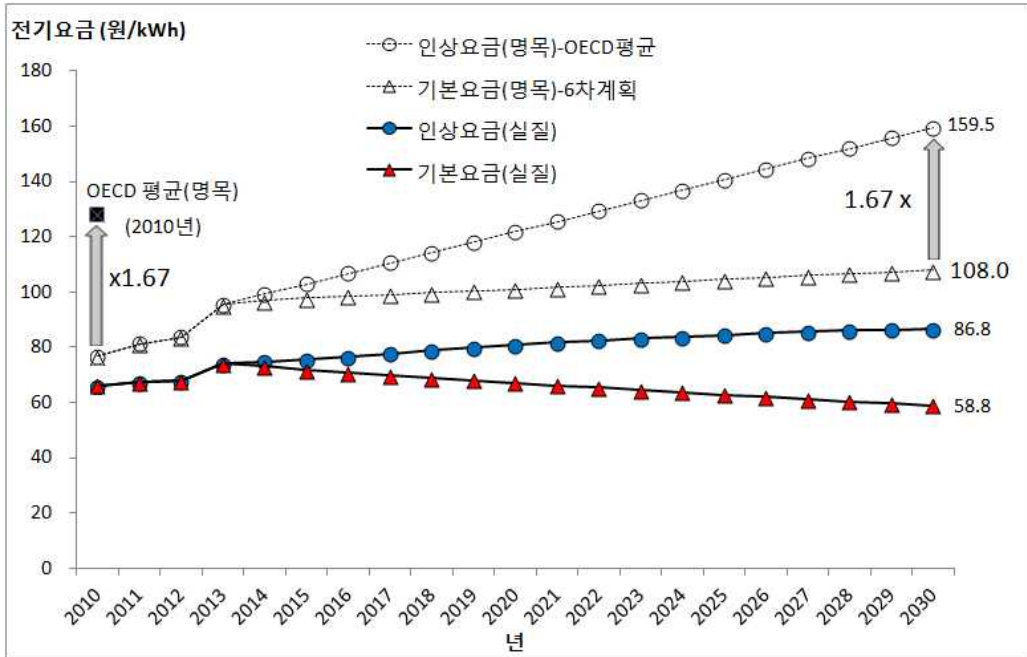
자료: 허가형(2013) 재구성

<그림 19> 제6차 전력수급기본계획에서의 명목·실질 산업용 전력요금 전망

원래 6차 전력수급기본계획에는 2014년까지 요금을 원가수준으로 현실화하고⁶⁰⁾ 그 이후부터는 과거 15년 동안의 인상률 수준을 적용하는 것으로 되어 있다. 그런데 6차 전력수급기본계획 전제를 보면 미래 소비자 물가지수 전망이 과거 인상률보다 높게 되어 있어서 실제로는 실질 전기요금이 줄어드는 것을 이미 전제하고 있다(허가형, 2013). 전력수급 불안정이 심각하고 그것이 낮은 전기요금에 의한 것이라는 비판이 제기되고 있는 상황에서 산업용 실질 전기요금이 낮아지도록 요금 인상률을 가정했다는 것은 바람직하다고 하기 어렵다.

60) 2012년 산업용 전기 원가회수율은 92.4%이다(출처: 전력통계 정보 시스템 <http://epsis.kpx.or.kr>).

이에 이 논문에서는 전기요금 인상의 필요성을 반영하여 전기요금 인상 시나리오를 구성하였다. 전기요금의 인상 수준을 어느 정도로 잡을 것인가에 대해 여러 기준이 있을 수 있는데, 이를테면 화석연료 대비 상대가격 수준을 고려하거나 전기의 사회적 비용(social cost)을 반영할 수 있을 것이다. 이 논문에서는 우리나라 요금이 OECD 평균 수준은 되어야 한다는 것을 전제로 2030년까지 산업용 전기요금을 OECD 평균만큼 인상하는 것을 가정하였다. 2030년 의 OECD 평균 산업용 전기요금을 전망하는 것은 이 논문의 분석범위를 넘어서기 때문에 편의상 제6차 전력수급기본계획에서 가정한 우리나라 2030년 산업용 전기요금 전망치(108.0원/kWh)보다 2010년 시점의 배율 차이만큼 크다고 가정하였다. 2010년 OECD 평균 산업용 전기요금(110.8 USD/MWh)은 우리나라 요금(66.3 USD/MWh)에 비해 1.67배 수준이었으며(IEA, 2013), 이를 근거로 2030년 우리나라 산업용 전기요금이 159.5원/kWh가 될 것으로 전망되는데, 이는 2010년 76.6원/kWh에 비해 2.1배 정도 상승하게 되는 수준이며, 실질요금으로 따지면 1.3배 정도 상승하게 것이다. 이를 그래프로 나타내면 <그림 20>과 같다.

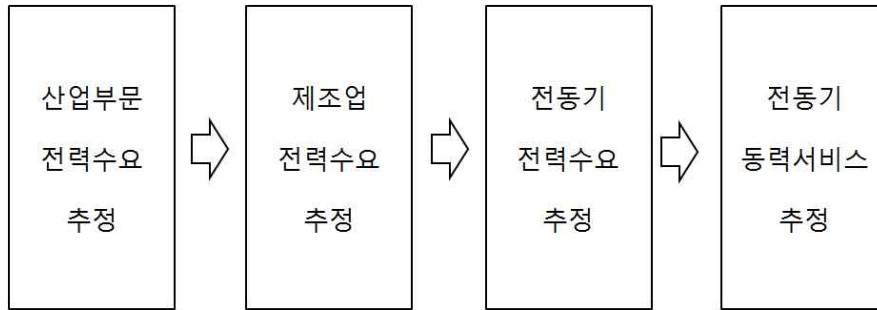


주: 명목요금 전망과 소비자물가지수 전망은 제6차 전력수급기본계획에서의 전제치를 이용함.

<그림 20> 산업용 전기요금 인상 시나리오

3) 전동기 동력서비스 수요 추정

제조업에서 전동기를 통해 얻는 동력서비스는 <그림 21>과 같은 단계를 통해 추정하였다. 먼저 미래 산업부문 전력수요를 추정한 뒤, 여기에 산업 전력 수요 중 제조업 전력수요 비중을 곱해 제조업 전력수요를 추정한다. 그리고 다시 제조업에서의 전동기 비중을 곱해 전동기 전력수요를 도출한 뒤, 이로부터 동력서비스를 추정한다.



<그림 21> 전동기 동력서비스 추정 단계

먼저 산업부문 전력수요는 차경수 외(2008)의 산업용 전력수요함수를 이용하여 추정하였다. 이는 이 연구가 우리나라 산업용 전력수요를 추정한 비교적 최근 연구이고, 에너지 수급과 거시경제변수 상호 간 연계를 반영하는 연립방정식을 이용하였으며, 모의실험에서 적합성과 안정성이 높은 것으로 나타났기 때문이다. 차경수 외(2008)에서 추정한 산업용 전력수요 함수식은 다음과 같다.

$$\ln(IEIe_t) = -4.152 + 0.374\ln(IEIe_{t-1}) - 0.045\ln(PRIEe_t/CPI_t) + 0.757\ln GDP_t$$

(0.681) (0.066) (0.040) (0.092)

$\sigma^2 = 0.019$, $\overline{R^2} = 0.999$, D.W.=1.41, ()안은 추정치의 std error를 의미.

$IEIe$: 산업부문 전력수요 (1,000 toe)

$PRIEe$: 산업용 전기요금 (천원/toe)

CPI : 소비자 물가지수 (2005=100)

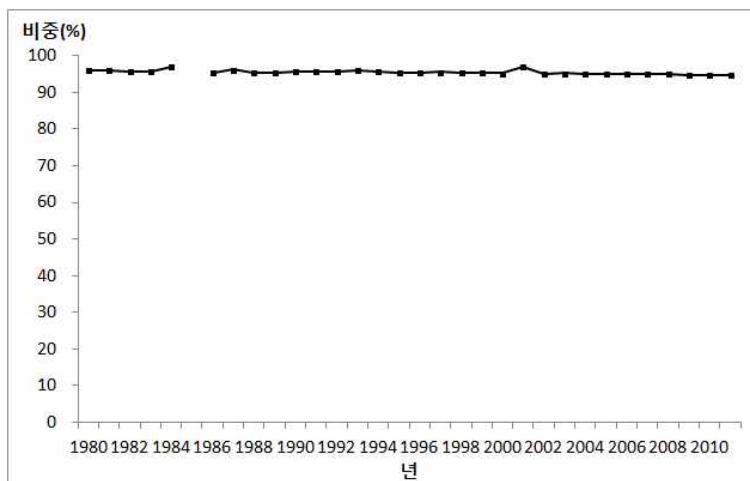
GDP : 실질국민소득(십억원, 2000 불변가격 기준)

위 식에 제6차 전력수급기본계획에서 전제한 산업용 전기요금 전망치와 소비자물가지수 전망치, GDP 성장률 전망치(KDI)를 이용하여 산업부문 전력수요를 도출한 후, 산업부문 전력소비에서 제조업이 차지하는 비중(최근 5년 평균 94.8%)을 적용해 미래의 제조업 전력 수요를 전망하였다.⁶¹⁾

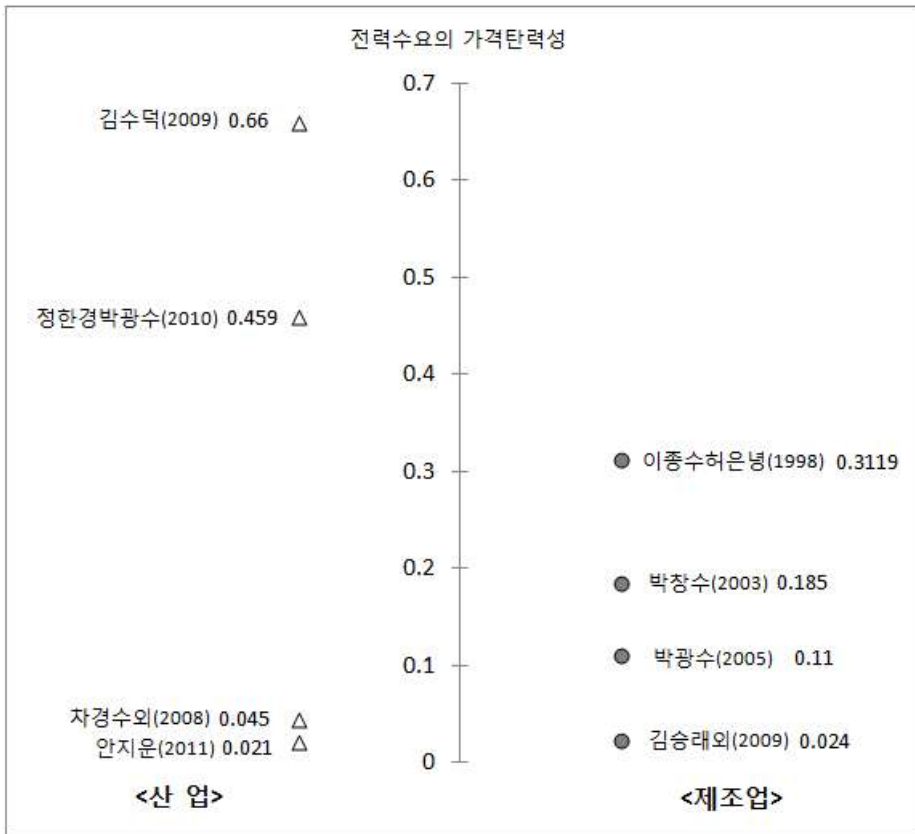
61) 산업부문 전력소비의 대부분은 제조업이 차지하며, 그 비중도 거의 변하지 않

한편, 다음 <그림 22>와 같이 산업·제조업분야 전력수요의 가격탄력성은 방법론과 변수, 분석 기간 등에서 차이가 나는 국내 여러 선행들이 있는데, 이 연구에서는 여러 가격탄력성 변화를 적용하여 살펴본다는 차원에서 대표적으로 세 가지 선행연구 결과를 이용하였다. 즉, 차경수 외(2008)를 비롯해 정한경·박광수(2010)와 김수덕(2009)의 전력 가격탄력성을 이용하였으며,⁶²⁾ 특히 김수덕(2008)은 전기 이외 타에너지원의 가격변화로 인한 전기요금의 상대가격체계 변화까지 고려하였다는 점에서 의미가 있다. 이들 연구에서 추정한 전력수요의 가격탄력성은 각각 0.045, 0.460, 0.66으로 국내 산업용 전력수요 가격탄력성 추정치들 중 비교적 작은 값, 중간 값, 큰 값에 해당한다.

왔는데(1980~2011년 평균 95.5%), 다음과 같다.

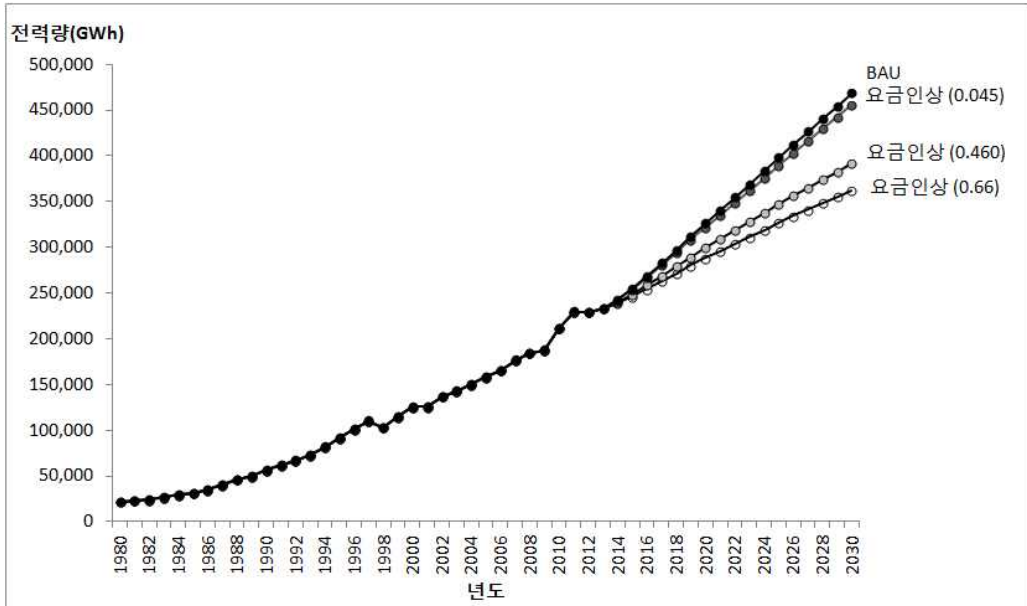


62) 이 논문에서는 산업용 전력수요의 탄력성을 직접 추정하지는 않고 기존 선행 연구에서 추정한 다양한 탄력성에 의한 값의 수요 변화를 살펴보는데 초점을 두기로 한다. 즉, 기존 국내 선행연구 중 추정모형의 특징이나 탄력성의 수준 등을 고려하여 세 가지 탄력성 값을 선정하였다.



<그림 22> 우리나라 산업/제조업 전력수요의 가격탄력성 추정치

이와 같은 과정을 통해 추정한 미래 제조업 전력수요와 2030년 OECD 평균 수준으로 전기인상 시 전력수요 전망은 다음 <그림 23>과 같다.



- 주: 1. BAU는 차경수 외(2008)를 이용하여 추정하였음.
 2. 가격탄력성 0.045는 차경수 외(2008), 0.460은 정한경·박광수(2010), 0.66은 김수덕(2009)을 이용한 것임.
 3. 가격탄력성에 따른 각 전력수요의 연평균 복합 성장률(Compound Annual Growth Rate; CAGR)은 탄력성 0.045일 때 3.79%, 탄력성 0.460일 때 2.92%, 탄력성 0.66일 때 2.47%임.

<그림 23> 제조업부문 전력수요 전망

그 다음 제조업 전동기의 전력수요를 추정하려면 제조업 전력수요 전망에 전동기 비중을 적용해야 하는데, 업종별로 전동기 비중의 차이가 있으므로 업종별로 구분하여 제조업 전력 수요 전망을 업종별 비중을 곱했다. 제조업의 전력수요를 업종별로 분리하기 위해 미래의 업종별 원단위 전망과 업종별 부가가치 전망을 곱해서 구한 업종별 전력 수요량의 상대적 비중을 이용하여 업종별로 세분화하였다. 여기서 미래 업종별 원단위는 과거 업종별 원단위의 추세를 이용하여 로그함수를 이용해 외삽하여 추정하였고, 미래 업종별 부가가치 전망은 제6차 전력수급기본계획에서 KDI 자료를 인용하여 제시한 우리나라 경제성장률 전망치⁶³⁾와 산업연구원(2012)의 우리나라 제조업 업종별 부가

63) 경제성장률 전망이 2027년까지만 되어 있는데, 이 논문에서는 2028~2030년 부

가치 비중 전망치를 이용하였다. 경제성장률 전망치와 업종별 경성부가가치 전망은 <표 19>, <표 20>와 같다. 그런 다음 업종별 전력 소비에서 전동기가 차지하는 비중이 앞으로 계속 유지된다고 가정하고 2010년도 비중을 적용해 미래의 업종별 전동기 전력 수요를 전망하였으며, 그 값은 다음 <표 21>과 같다. 그런 다음 다시 업종별 전동기 전력소비량을 합산하여 제조업에서의 전동기 전력수요 전망치를 얻었다.

<표 19> GDP 성장률 전망치(KDI)

(단위: %)

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2018	2020	2024	2027
2.2	3.0	4.3	4.5	4.5	4.3	4.1	3.8	3.5	3.1	2.7

자료: 지식경제부(2013), 허가형(2013)

<표 20> 제조업 업종별 경성부가가치 비중 전망

(단위: %)

	2020년	2030년
기계장비	17.5	17
석유화학	4.5	3.9
1차금속	3	2.4
섬유	1.2	0.9
요업	0.7	0.5
제지·인쇄·목재	0.6	0.4
식료품	0.9	0.6
기타	0.3	0.2
계	28.7	25.9

주: 전체 총 부가가치 대비 상대 비중임

자료: 산업연구원(2012) 재구성

가가치 성장률은 이전의 성장률 추세가 계속 이어진다고 가정하였다.

<표 21> 제조업 업종별 전동기 전력소비 비중

(단위: %)

업종	전체 전력소비에서 전동기 전력소비 비중
기계장비	37.8
석유화학	48.7
1차금속	37.0
섬유	49.8
요업	54.2
제지·인쇄·목재	50.1
식료품	51.9
기타	43.7

주: 2010년 기준임

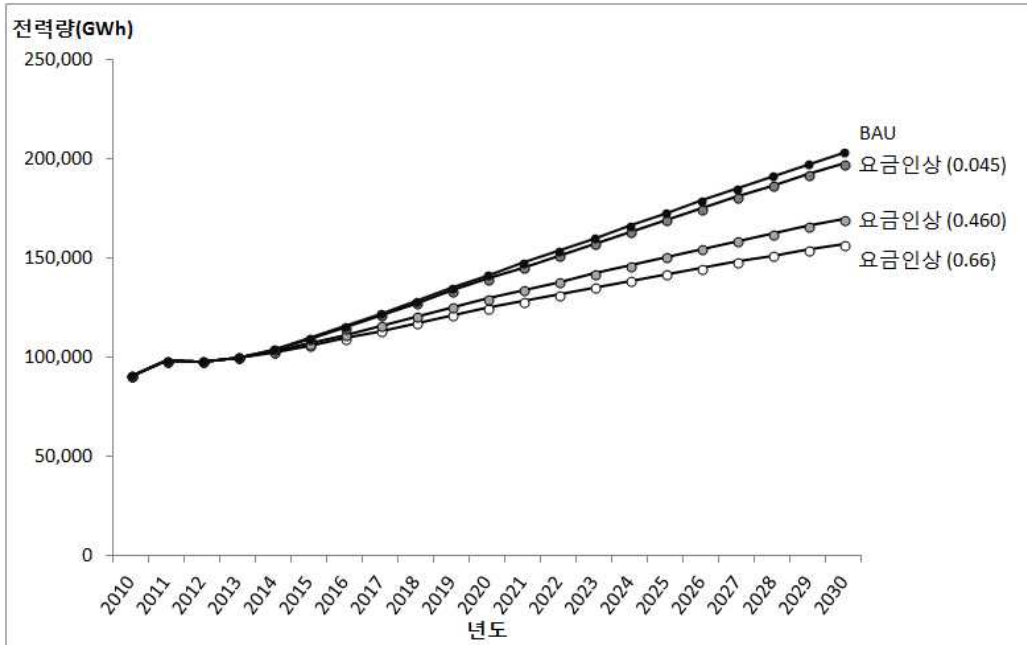
자료: 지식경제부(2012b) 재구성

마지막으로 제조업에서의 전동기 동력서비스를 추정하려면 제조업 전동기 전력 수요 전망에 전동기의 효율을 곱해서 유효에너지를 추정해야 한다. 그런데 전동기에 대한 효율자료는 전동기 종류별, 용량별로 구분되어 있기 때문에 종류별, 용량별로 구분하여 전력 수요전망에 효율을 곱하였다. 전동기 종류별, 용량별 구분은 2010년도 전력소비량 비중을 이용하였고, 전력소비량은 다음과 같이 전동기 용량과 평균 부하율, 가동률을 이용해 추정하였다.

전동기의 총 전력사용량

$$= \sum(\text{전동기별 용량} \times \text{전동기대수} \times \text{평균부하율} \times \text{평균가동율}) \times 24\text{시간} \times 365\text{일}$$

이렇게 해서 얻은 제조업 전동기 동력서비스 BAU 전망과 2030년 OECD 평균 수준으로 산업용 전기요금을 인상했을 때의 동력서비스 전망은 다음 <그림 24>와 같다.



주: 요금인상에서 괄호값은 적용한 산업용 전력 가격탄력성 수치임

<그림 24> 제조업 전동기 동력서비스 수요 전망

3) 전동기 특성 자료

전동기는 크게 교류전동기(Alternating Current Motor; AC Motor)와 직류전동기(Direct Current Motor; DC Motor)로 구분할 수 있으며, 이 중에서 교류전동기는 다시 유도전동기(Induction Motor)와 동기전동기(Synchronous Motor)로 구분할 수 있다. 유도전동기는 구조가 간단하고 비용이 저렴하며 회전속도가 일정하며 효율적이다. 그리고 내구성도 높기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 동기전동기는 회전속도가 아주 정확하기 때문에 소형시계나 타이밍 모터, 컨베이어벨트용 전동기 등에 사용된다. 그리고 유도전동기와 동기전동기는 다시 삼상(Three-Phase)과 단상(Single Phase)으로 구분할 수 있다. 한편, 직류전동기는 오래전부터 사용되어온 전동기로서 속도제어가 용이해서 전철, 엘리베이터, 압연기와 같이 속도 조절이 필요한 경우에 주로 사용되고 있는데, 정류기가 별도로 필요하고 고속화에 한계가 있다.⁶⁴⁾ 이밖에도 전동기

는 다양한 용량과 극수(No. of pole), 외함(Enclosure) 구조를 가지고 있어서 여러 환경과 용도에 따라 다양하게 사용되고 있다. 극수는 보통 2극, 4극, 6극, 8극 등이 있으며, 극수에 따라 전동기의 회전수가 달라지는데 극수가 많아질수록 회전수가 느려진다. 그리고 외함 구조는 전동기가 사용되는 환경에 맞게 밀폐 정도에 따라 전폐형, 반폐형, 개방형 등이 있다.

이 논문에서는 전동기를 삼상유도 전동기, 고효율 전동기, 단상유도전동기, 직류전동기, 기타 전동기로 구분하고, 이 중에서 가장 많이 사용되고 있는 삼상유도 전동기는 용량별로 7구간(7.5kW 이하, 7.5~15kW, 15~37kW, 37~75kW, 75~150kW, 150~370kW, 370kW 이상)으로 세분화하였다. 사실 엄밀하게 보면 전동기는 필요에 따라 높은 효율이 중요한 경우도 있고, 빠른 속도가 중요한 경우도 있고, 혹은 강한 토크가 중요한 경우도 있다. 그래서 전동기 분석 시 용량별 구분보다는 용도별로 고효율, 고속, 저속·고토크 전동기로 구분하는 것이 바람직하다.⁶⁵⁾ 그러나 현재 우리나라에는 전동기의 용도별 특성에 따른 데이터베이스가 제대로 구축되어 있지 않아 종류별, 용량별로 구분하여 분석을 하였다. 그리고 효율, 비용(초기투자비용, 유지관리비용), 신기술 도입가능시점 데이터는 에너지관리공단(2009) 자료를 활용하였다.

삼상유도 전동기는 가장 많이 쓰이는 전폐형 4극이라고 가정하였으며, 신기술은 삼상유도 전동기의 각 용량별 기존기술에 대응하여 개발될 것이라고 가정하였다. 신기술 도입가능시기는 에너지관리공단(2009)에서 전망한 2013~2020년 기간 중에서 보수적 관점에서 제일 늦은 시점인 2020년으로 하였다. 에너지관리공단(2009)에서 조사한 고효율삼상 전동기 자료는 2008년 조사 당시의 자료이므로 2010년 시점의 IE2와 구분하였으며, 별도의 대안 신기술은 없는 것으로 가정하였다. 직류 전동기, 단상유도 전동기, 기타 전동기는 전체

64) 두산백과사전

65) 현재 전동기는 크게 수퍼프리미엄급 전동기와 고속 전동기, 직구동 전동기가 개발 중에 있다. 수퍼프리미엄급 전동기는 고효율 전동기에 비해 효율이 2% 정도 높은 전동기이고, 고속 전동기는 증속기와 같은 부가장치가 필요 없어 공간이용을 80% 이상 줄이고 에너지 손실도 10% 이상 줄일 수 있는 전동기이다. 직구동 전동기는 유압이나 감속기가 없이 저속·고토크를 낼 수 있는 전동기로서 기어가 필요 없고 고정밀의 위치제어가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 아직 우리나라에서는 이들에 대한 연구가 부족한 상태로 기술개발이 더 필요하다(한국에너지기술평가원, 2011).

전력 사용량 중 차지하는 비중도 적고 신기술 정보가 없어 신기술을 적용하지 않았다.

전동기 수명은 용량이나 설치방식, 공급 전력 상태, 부하, 사용 환경(온도, 절연 상태 등), 사용 방식에 따라 차이가 날 수 있고, 또 수명을 정의하는 관점에 따라서도 달라질 수 있다. 후자의 경우, 전동기가 고장이 나더라도 수리나 부품 교체를 통해 사용기간이 연장될 수 있기 때문에 전동기의 수명에 대한 정의가 다양할 수 있다. 예를 들어, 수명을 생산자 보증기한으로 볼 수도 있고, 1차 수리 시점 이전까지로 볼 수도 있고, 간단한 부품교체를 통해 사용할 수 있는 시점이나 주요 부품 교체를 통해 사용할 수 있는 시점 등 여러 관점에서 정의할 수 있다(에너지관리공단, 2004). 해외 연구들에서는 전동기 수명을 대체로 10~20년 정도로 보고 있으며(Barnes, 2003; IEA, 2011), 에너지관리공단(2004)에서는 국내 전문가 의견을 바탕으로 1차 수리 이전 시점까지를 기준으로 하여 20년으로 보았다. 이 논문에서는 에너지관리공단(2004)의 추정치가 해외 선진국 추정치에 비해 길다고 판단하고, 해외의 대략적 평균치인 15년을 적용하였다.

4) 최적가용기술 및 고효율 전동기 특성자료

전동기의 BAT⁶⁶⁾는 IMSSA(International Motor Selection and Saving

66) BAT는 원래 유럽연합의 통합 오염예방 및 제어(Integrated Pollution Prevention and Control; IPPC) 지침에 있는 개념으로서 오염물질 배출이나 환경피해 예방 및 저감에 관한 배출 기준치를 도출할 수 있도록 하기 위한 실제 이용가능하고 가장 효과적이며 진보적인 활동이나 운용방식 단계를 의미한다. 여기서 실제 이용가능하다는 것은 기술적으로나 경제적으로 산업부문에서 실행할 수 있다는 것을 의미하는 것으로(출처: Council of the European Union, council directive 96/61/EC, eippcb.jrc.es. Accessed 2007-07-05). 미국 청정수법(the Clean Water Act, CWA) Section 304(b)(2)에서처럼 BAT 정의 자체를 경제적으로 달성 가능한 최적가용기술(Best Available Technology Economically Achievable)로 하기도 한다(출처: EPA 홈페이지 http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/questions_index.cfm). 아울러 BAT는 오염물질 배출뿐만 아니라 에너지절감에서의 최적 기술로도 정의된다(Lu et al., 2013).

Analysis) 자료를 참고로 해서 도출하였다.⁶⁷⁾ IMSSA 프로그램은 전동기 판매자나 에너지 컨설턴트, 전동기 소비자를 대상으로 시장에 출시된 전동기의 상세 정보, 즉 제조사별 전동기 용량, 밀폐형태, 극수, 전압, 효율, 비용, 역률, 토크, 암페어 등에 관한 정보를 무료로 알려주는 프로그램이다. 원래는 미국의 MotorMaster+ International⁶⁸⁾이나 EU의 EuroDEEM international⁶⁹⁾같이 전동기 정보 제공 프로그램이 개별적으로 개발·운용되었는데, 국제적으로 고효율 전동기에 대한 정보공유의 필요성에 대한 공감대가 형성되면서 몇몇 국가 정부와 구리 생산기업 등⁷⁰⁾의 지원을 바탕으로 IMSSA가 개발되었다. 이 프로그램은 25,000개의 국립 전기제조업자 연합(National Electrical Manufacturers Association, NEMA) 전동기와 7,200개의 국제전자기술위원회(International Electrotechnical Commission; IEC) 전동기에 관한 데이터가 담겨 있다. 그래서 주요 제조사별로 생산되는 전동기의 용량이나 밀폐형태, 극수, 전압, 효율, 비용, 역률, 토크, 암페어 등에 대한 정보를 제공함과 동시에

67) 현재 MotorMaster+ International이나 EuroDeem International 프로그램을 실행하면 IMSSA 프로그램으로 연계되어 구동되고 있다.

(MotorMaster+ International 홈페이지
https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/software_motormaster_intl.html

EuroDeem International 홈페이지
<http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/eurodeem/> 검색일자 2013.07.26)

68) 1993년 미국 에너지부(the US Department of Energy; USDOE)는 워싱턴 주립 대학교(Washington State University)와 협력하여 Motomaster+ 프로그램을 개발하였고, 이후 계속된 개선작업을 하였다. 그리고 현재 미국 에너지부 산업기술 프로그램(the US Department of Energy's Industrial Technologies Program)에서 고효율 전동기 선택에 도움을 주고자 이를 무료로 제공하고 있다(McKane et al., 2005).

69) 1995년 유럽연합(European Commission)의 Joint Research Centre(JRC)에서 처음 개발에 착수하였고, 1998년에 첫 버전을 출시했다. 현재 유럽 전동기 제조업자로부터 수집한 데이터를 바탕으로 지속적으로 업데이트되고 있다. (출처: <http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/eurodeem/> 검색일자. 2013.07.26)

70) International Copper Association(ICA), U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, the Corporacion Nacional del Cobre de Chile(Codelco), Natural Resources Canada, the UK Action Energy(Carbon Trust), the Joint Research Centre, European Commission을 중심으로 국제 컨소시엄을 구성하여 프로그램 개발을 지원하였다(출처: IMSSA user's Guide version 2)

전동기 선택에 따른 에너지 절감량과 비용 절감량까지 계산하여 준다. 한편, 2004년에는 IMSSA를 기반으로 하여 캐나다 버전의 Canadian Motor Selection tool(CanMOST)도 개발되고, 아울러 칠레 버전도 개발되었다.

이 연구에서는 IMSSA 데이터 중 팬과 펌프 용도로 많이 쓰이는 전동기 기준인 NEMA Design A·B에 해당하는 전동기 DB를 이용하였다. 그리고 가장 많이 쓰이는 전폐형(Totally Enclosed Fan Cooled, TEFC) 4극 전동기에 한정하여 세부용량별, 전압별 최고 효율값을 선정한 뒤, 이를 해당 용량 구간의 BAT로 선정하였다. 그리고 최고 효율에 해당하는 전동기 비용을 해당 BAT의 비용으로 적용하였다. 다음 <그림 25>, <그림 26>은 IMSSA의 화면을 캡처해서 나타낸 것이다.

Motor Selector

Search Select Clear Detail Reset Cols Print Help Close

Query Parameters

Motor type: NEMA Design B/NEMA Design A Rebate program: <None>

Size: 25 HP Frame size: <All>

Speed/Poles: 3600 (2) RPM

Enclosure type: TEFC

Voltage: 200

Definite purpose: <General - purpose motor>

Manufacturers (9) All ☒

☐ C-face: ☐ Vertical shaft: ☐ U-frame: ☐

☐ NEMA Premium

Query Results

Manufac	Mod	Catalo	HP	Encl	Eff FL IEEE %	EF F	Volta	RP M	PF FL	Am ps	Fra	LR Trq	List Price (\$)	Last Upd
Baldor-R	SUPE	EM410	25	TEFC	93.2		200	530	91.0	63.0	284	80.0		2010-01-2
WEG Ele	Sever	02536E	25	TEFC	93.0		208-2			28.4	284		2,998	2010-06-1
WEG Ele	02536	Pad Mc	25	TEFC	93.0		208-2			28.4	284		3,328	2010-06-1
Dayton	GP-Pr	2MXW	25	TEFC	92.4		208-2	555	91.8	27.8	284	65.7		2010-02-1
US Motor	Unimc	U25P11	25	TEFC	91.7		208-2	530	89.9	28.4	284	67.3	3,612	2010-03-2
AD_Smith	NEMA	T5701C	25	TEFC	91.7		208-2	520	89.2	28.7	284	92.8		2007-04-0
Tatung	Super	WH025	25	TEFC	91.7		208-2	520	90.5	28.7	284	85.8	2,602	2010-02-2

20 motors found

<그림 25> IMSSA 캡처 화면 1

<그림 26> IMSSA 캡처 화면 2

아울러 현재 시장에 고효율 전동기로 출시된 전동기의 DB 구축을 위해 에너지관리공단 효율등급제도에 IE2, IE3로 등록된 삼상유도 전동기(전폐형 4극)의 평균 효율과 고효율 전동기(전폐형 4극)의 2010년 평균 유통물가⁷¹⁾를 이용하였다. IE3 비용은 자료가 없어 IE1 비용 대비 IE2 비용 비율을 활용하여 IE2에 적용해 추정하였다. 전동기의 연간 유지보수비용은 에너지관리공단(2004)의 방식에 따라 초기투자비의 10%를 적용하였다.

다음 <표 22>는 분석에 사용된 전동기 주요 특성 자료들을 정리한 것이다.⁷²⁾

71) 유통물가 홈페이지 <http://www.isayprice.com/>

72) 에너지관리공단(2009)에서 제시한 전동기 기존 기술과 신기술 특성자료는 비공개자료이므로 이 논문에서 구축한 DB자료만 제시하였다.

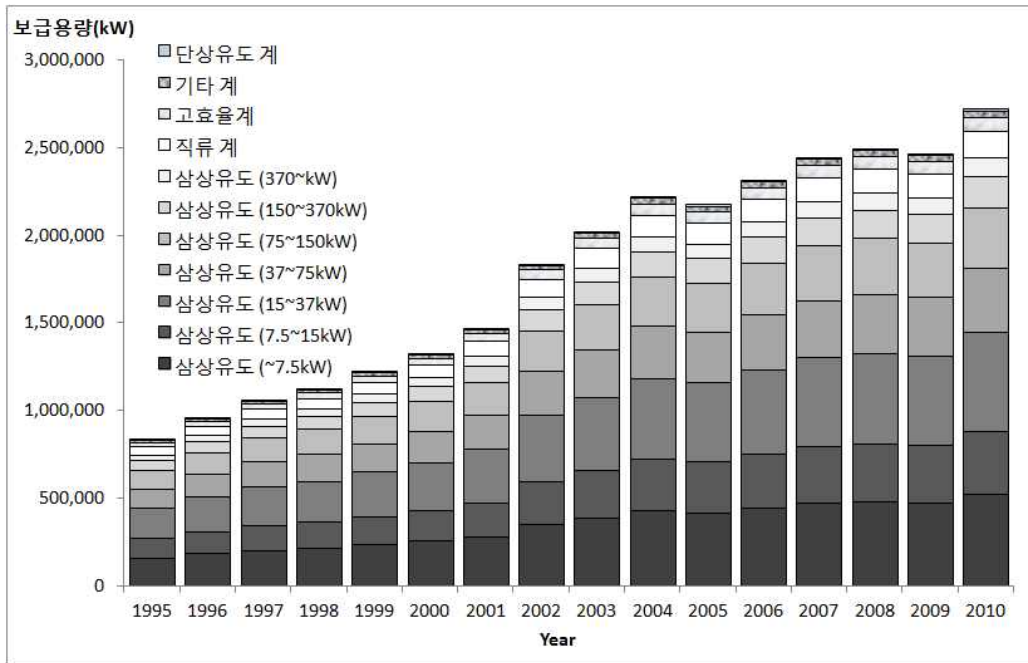
<표 22> 삼상유도 전동기의 고효율 기술 특성자료

용량(kW)	특성	고효율 전동기		
		IE2	IE3	BAT
7.5 이하	효율 (%)	87.1	89.4	88.9
	초기투자비 (천 원/kW)	157.880	203.991	240.089
	유지보수비 (천 원/kW)	15.788	20.399	24.009
7.5 ~ 15	효율 (%)	90.9	92.7	92.1
	초기투자비 (천 원/kW)	77.623	101.095	109.306
	유지보수비 (천 원/kW)	7.762	10.110	10.931
15 ~ 37	효율 (%)	92.9	94.1	93.8
	초기투자비 (천 원/kW)	78.490	101.094	127.015
	유지보수비 (천 원/kW)	7.849	10.109	12.702
37 ~ 75	효율 (%)	94.2	95.5	95.1
	초기투자비 (천 원/kW)	87.864	106.730	144.541
	유지보수비 (천 원/kW)	8.786	10.673	14.454
75 ~ 150	효율 (%)	95.2	95.9	95.9
	초기투자비 (천 원/kW)	90.941	105.456	184.431
	유지보수비 (천 원/kW)	9.094	10.546	18.443
150 ~ 370	효율 (%)	95.6	96.3	96.3
	초기투자비 (천 원/kW)	87.427	100.118	145.539
	유지보수비 (천 원/kW)	8.743	10.012	14.554
370 이상	효율 (%)		95.9	
	초기투자비 (천 원/kW)		271.896	
	유지보수비 (천 원/kW)		27.190	

5) 전동기 과거 보급용량 추정

국내 전동기 보급대수 통계는 아직까지 제대로 조사되어 구축된 적이 없기 때문에 에너지관리공단(2004)과 지식경제부(2008a)를 활용하여 추정하였다. 즉, 에너지관리공단(2004)에서 제시한 1997~2004년 사이 연도별 전동기 보급용량을 바탕으로 부가가치 대비 로그함수를 활용해 전동기 보급용량을 2010년까지 외삽하여 추정하였다. 이렇게 추정한 전동기 용량이 적절한 수준인지 판단하기 위해 전동기의 전력사용량을 통해 확인해 볼 수 있다. 2010년도 전동기 보급용량 추정치에 기존에 조사된 전동기 관련 평균 부하율, 가동률, 효율을 곱하면 2010년도 전동기 전력 사용량이 도출되며, 이를 총 전력사용량 통계와 전동기 전력사용량 비중으로부터 구한 전동기 전력사용량과 비교하면 된다. 그런데 이렇게 상향식과 하향식으로 각각 추정한 값은 서로 차이가 날 수 있으며, 이는 정확한 통계 및 데이터의 부재로 인해 불가피하게 발생하는 문제이다. 이 논문에서도 추정한 결과도 상향식 접근과 하향식 접근 간에 차이가 있었으며, 전동기 용량의 과대 추정이 있다고 판단해 일정 수준의 조정계수를 곱해 통계적 일치를 시켰다.⁷³⁾ 이렇게 추정한 연도별 보급용량은 다음 <그림 27>과 같다.

73) 상향식 접근에 의한 전동기 전력사용량은 하향식 접근에 의한 추정의 365% 수준으로 나왔으며, 조정계수는 이의 역수인 27.37%를 사용하였다. 참고로 IEA(2011)에서 추정한 우리나라 전동기 전력 수요는 상향식 접근이 하향식의 220% 수준으로 나왔으며, 이는 2006년 데이터를 바탕으로 추정한 것으로 되어 있다.



<그림 27> 우리나라 제조업 전동기 연도별 보급용량 추정치 (1995-2010)

6) 부하율 적용

전동기의 효율은 부하율에 따라 달라지기 때문에 부하율에 따른 효율값을 적용할 필요가 있다. 다음 <표 23>은 IMSSA에 있는 전동기 데이터⁷⁴⁾를 바탕으로 최고 효율 대비 효율 저하율을 부하율에 따라 전동기 용량별로 도출한 것이다. 이를 바탕으로 한국 산업용 평균 부하율 65%(지식경제부, 2008a)에서의 효율 저하율은 효율과 효율 저하율 간의 관계를 로그함수라고 가정하고 추정하였다. 그 결과, 부하율 65%에서의 효율은 최고 효율에 비해 2.59%(7.5kW 이하), 1.45%(7.5~15kW), 1.12%(15~37kW), 0.93%(37~75kW), 0.81%(75~150kW), 0.64%(150~370kW), 0.50%(370kW 이상)만큼 감소하는 것으로 추정되었다. 이들 수치를 BAU 시나리오에 반영하였으며 부하율 향상 시나리오에서는 효율 저하율이 0%라고 가정하였다.

74) 가장 많이 쓰이는 전폐형 4극 전동기에 한해 용량별 평균치를 도출하였다.

<표 23> 부하율에 따른 효율 저하율 (부하율 75% 기준)

(단위: %)

kW	부하율 25%	부하율 50%	부하율 100%	부하율 65%(추정)
~7.5	14.08	2.93	-0.08	2.59
7.5~15	7.33	1.05	0.64	1.45
15~37	5.48	0.81	0.56	1.12
37~75	4.72	0.78	0.35	0.93
75~150	4.17	0.77	0.22	0.81
150~370	3.17	0.79	0.09	0.64
370~	2.43	0.59	0.12	0.50

주. 부하율 75%일 때의 효율을 최고 효율로 두고 효율 저하율을 산정함.

7) 인버터의 특성 자료

인버터의 수명, 효율 개선 효과, 비용은 다음 <표 24>와 같이 UNIDO(2010) 자료를 활용하였다.

<표 24> 인버터의 효율개선 효과 및 수명, 비용

	세부 구분	펌프 용도	팬 용도
효율 개선 (%)	저효율 기준 대비	25	35
	중효율 기준 대비	15	20
	고효율 기준 대비	10	8
비용 (\$)	37kW 이하	4,000	8,000
	37~75kW	9,000	15,000
	75~150kW	18,000	30,000
	150~370kW	30,000	80,000
	370kW 이상	65,000	150,000
수명 (년)		10	10

주: 1. 전동기 용도로 가장 많이 쓰이는 펌프와 팬에 관한 수치를 평균하여 적용함.

2. 고효율 기준 대비는 57.5%(팬), 67.5%(펌프)이상의 전동기에 해당하며 (UNIDO, 2010), 본 분석에 다루는 전동기가 이에 해당함.

3. 효율 개선 수치는 입력 전기사용량의 % 감소치를 의미함(UNIDO, 2010)

4. 인버터의 효율은 96%를 적용함.

자료: UNIDO(2010) 자료 재구성

3. Scenarios

제조업 전동기 분야 전력 소비에 관한 시나리오로서 현재 최저소비효율제가 시행되고 있는 상황을 BAU 시나리오로 두고, 여기에 추가적인 감축방안들을 병행할 때를 각각 시나리오로 하여 이들을 M계열 시나리오로 두었다. 그리고 최대 전력 감축잠재량 파악 차원에서 최저소비효율제도와 관계없이 BAT를 도입하는 경우와 여기에 추가적인 감축방안들을 병행하는 경우를 각각 시나리오로 설정하여 이들을 B계열 시나리오로 두었다. 한편, BAU 시나리오와 구분해서 최저소비효율제도를 시행하지 않았을 경우를 가정하여 이를 Reference 시나리오로 두었다.

각 시나리오들을 좀 더 자세히 살펴보면, 현재 시행되고 있는 최저소비효율제도 상황을 반영한 것이 BAU 시나리오이며, 여기에 전기요금 인상이나 최저소비효율제 확대, 전동기 부하율 향상, 인버터 설치가 개별적 내지 조합되어 추가 반영되는 것들이 M계열 시나리오이다. 첫째로 MC 시나리오는 2030년에 OECD 수준으로 우리나라 산업용 전기요금을 인상하는 시나리오이다. 2010년 기준으로 OECD 평균 산업용 전기요금(110.8 USD/MWh)은 우리나라 산업용 전기요금(66.3 USD/MWh)에 비해 1.67배 수준이었기 때문에(IEA, 2013), 이를 근거로 2030년에 우리나라 산업용 전기요금이 제6차 전력수급기본계획 전망치에 비해 1.67배 인상이 된다고 가정하였다. 이때 전기요금인상에 따른 행정비용은 고려하지 않았다. 둘째로 ME 시나리오는 200kW이상 삼상유도 전동기에 대해서도 최저소비효율제도를 확대 적용하는 시나리오이다. 현재 우리나라에서 의무 기준이 없는 200kW 이상 전동기에 대해서도 미국이나 EU처럼 의무 효율 기준을 도입한다고 가정하였다. 효율 기준 값은 미국 기준인 95.4~95.8%⁷⁵⁾와 EU 기준인 95.1%(IE2), 96.0%(IE3)를 참고로 보수적 관점에서 가장 낮은 값인 EU의 95.1% 기준을 적용하였다. ML 시나리오는 전동기의 부하율을 75%까지 향상시켜 전동기 효율을 향상시키는 시나리오이다. 부하율을 75%로 선택한 것은 부하율이 75~80% 수준에서 효율이 최고가 되

75) 300~450HP(224~336kW)에서는 95.4%, 500HP(373kW)에서는 95.8%이다.

기 때문이다. MV 시나리오는 인버터를 추가적으로 설치하는 시나리오이고, MF 시나리오는 전기요금 인상과 부하율 향상을 둘 다 도입했을 경우의 시나리오이며, MX 시나리오는 전기요금 인상, 최저소비효율제도 확대, 부하율 향상, 인버터 설치를 모두 도입했을 때의 시나리오이다.

그리고 최저소비효율제도와 관계없이 현재의 최적가용기술을 도입하는 것을 BT 시나리오로 두었으며,⁷⁶⁾ 여기에 2030년에 OECD 수준으로 우리나라 산업용 전기요금을 인상하는 것을 BC 시나리오, 전동기의 부하율을 75%까지 향상시켜 효율도 향상시키는 것을 BL 시나리오, 인버터를 추가적으로 설치하는 것을 BV 시나리오로 두었다. 그리고 전기요금 인상과 부하율 향상, 인버터 설치를 모두 도입했을 때를 BX 시나리오라 하였다. Reference 시나리오는 최저소비효율제도가 시행되지 않았을 경우를 가정하여 신기술 전동기나 고효율 전동기 도입 없이 기존 기술 전동기들이 계속 사용된다고 가정하였고, 이때 기술진보에 의한 자발적 에너지 효율개선(Autonomous Energy Efficiency Improvement; AEEI)도 없다고 가정하였다.

지금까지의 시나리오들을 요약하면 다음 <표 25>와 같다.

76) 이 경우, 기존 사용하던 전동기의 수명이 다 끝나고 새로운 전동기로 교체 시 BAT를 도입하는 것이다.

<표 25> 시나리오 구분

시나리오	내용
Ref	· 최저소비효율제를 시행하지 않았을 경우를 가정
BAU	· 최저소비효율제 적용
MC	· 최저소비효율제 적용 · 전기요금 인상 (OECD평균 수준)
ME	· 최저소비효율제 적용 · 최저소비효율제 확대 (200kW 이상에 대해서도 적용)
ML	· 최저소비효율제 적용 · 전동기 부하율 향상 (75%)
MV	· 최저소비효율제 적용 · 인버터 설치
MF	· 최저소비효율제 적용 · 전기요금 인상 (OECD평균 수준) · 전동기 부하율 향상 (75%)
MX	· 최저소비효율제 적용 · 전기요금 인상 (OECD평균 수준) · 최저소비효율제 확대 · 전동기 부하율 향상 (75%) · 인버터 설치
BT	· BAT 도입
BC	· BAT 도입 · 전기요금 인상 (OECD평균 수준)
BL	· BAT 도입 · 전동기 부하율 향상 (75%)
BV	· BAT 도입 · 인버터 설치
BX	· BAT 도입 · 전기요금 인상 (OECD평균 수준) · 전동기 부하율 향상 (75%) · 인버터 설치

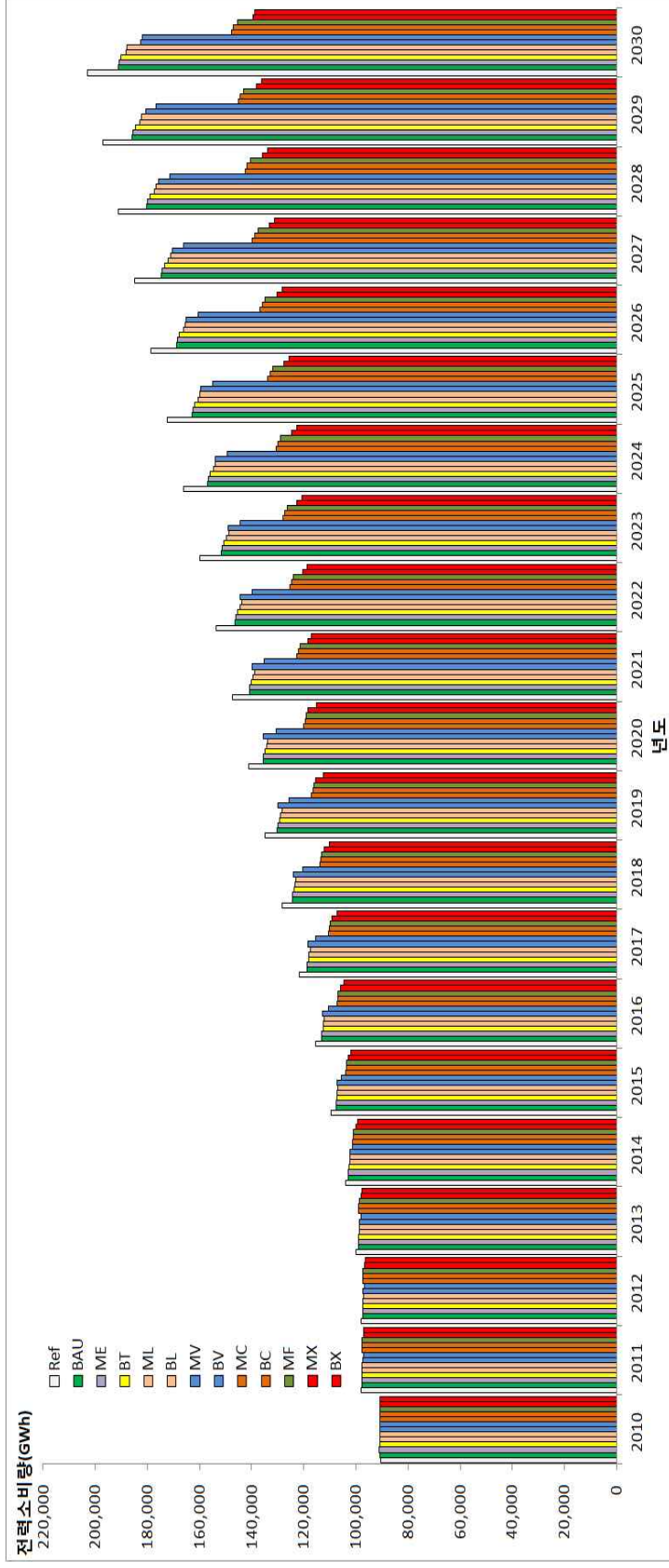
V. 분석 결과

1. MESSAGE 모형 분석 결과

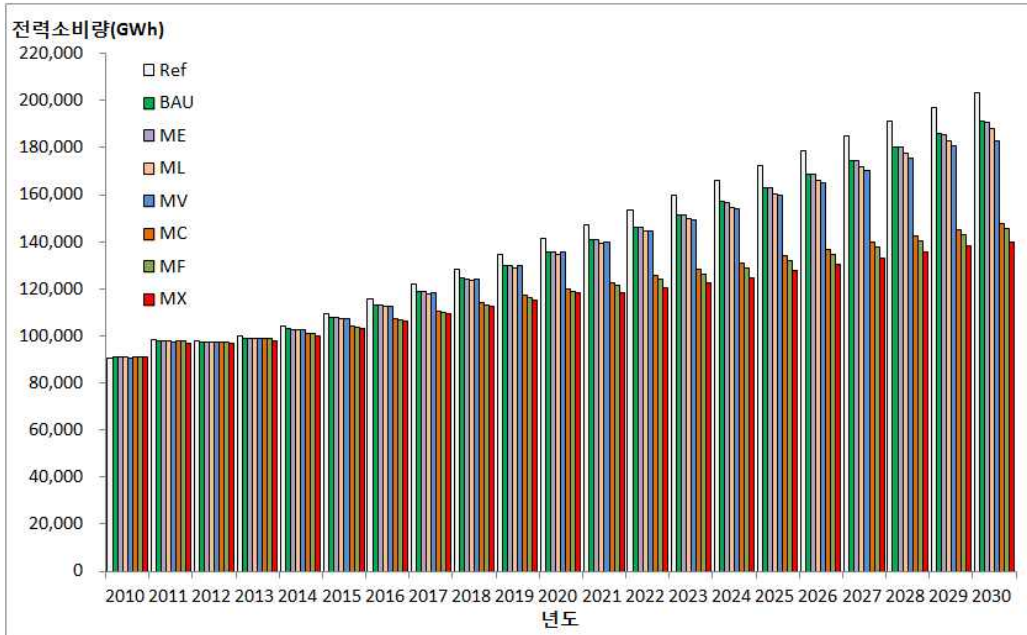
1) 시나리오별 전력소비량 전망

최저소비효율제도 시행을 포함한 M계열 시나리오들과 BAT 도입을 포함한 B계열 시나리오들의 제조업 전동기 전력사용량 전망치를 가격탄력성에 따라 세 가지로 구분하여 나타내면 다음 <그림 28>~<그림 36>과 같다. 적용한 각 가격탄력성별로 제시된 결과에서 첫 그림에는 모든 시나리오 결과를, 다음 두 그림에는 M계열 시나리오들과 B계열 시나리오들을 각각 구분해서 나타내었다.

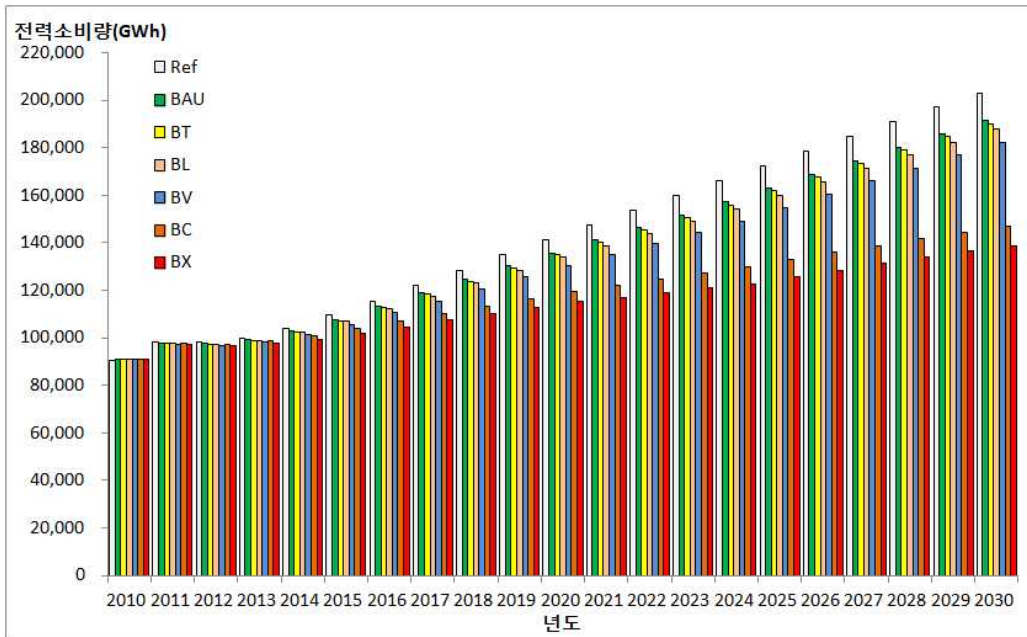
(1) 산업부문 전력 가격탄력성 0.66 적용 시



<그림 28> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.66 적용)

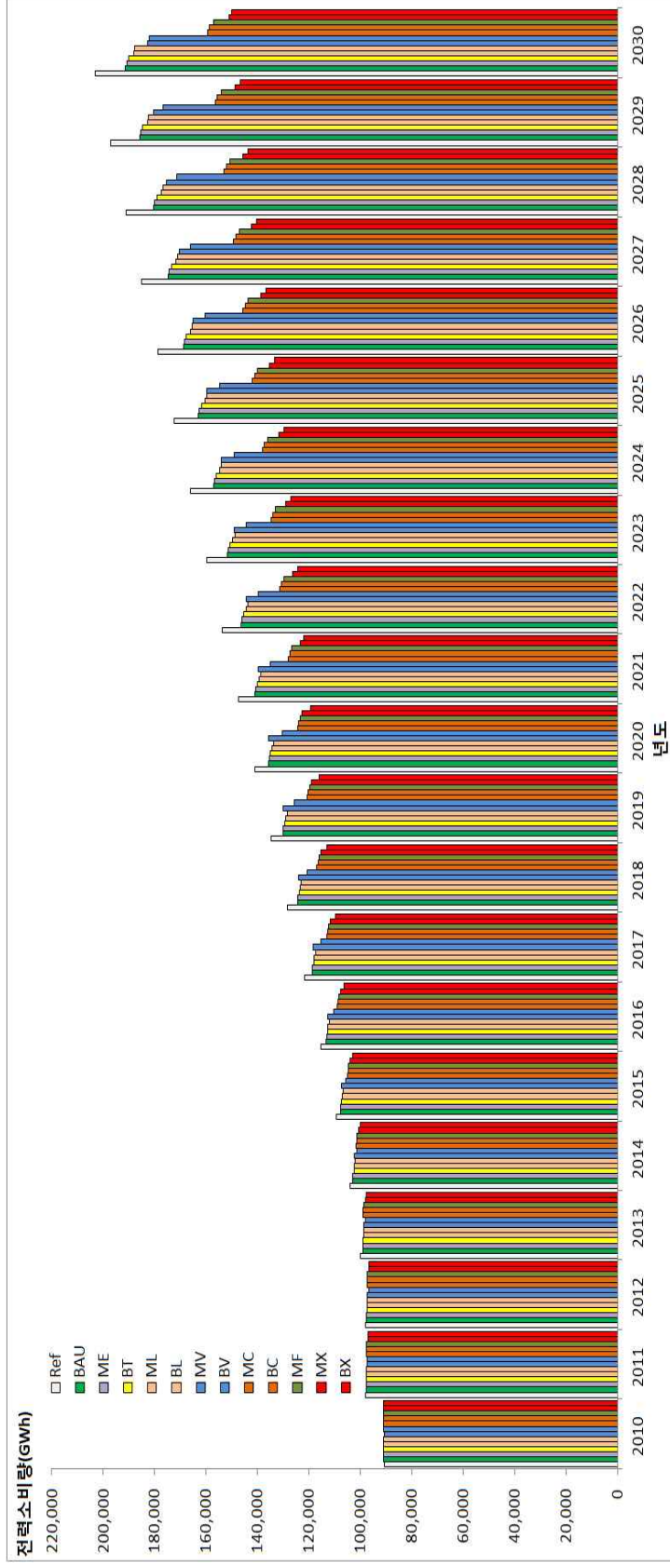


<그림 29> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력가격탄력성 0.66 적용)

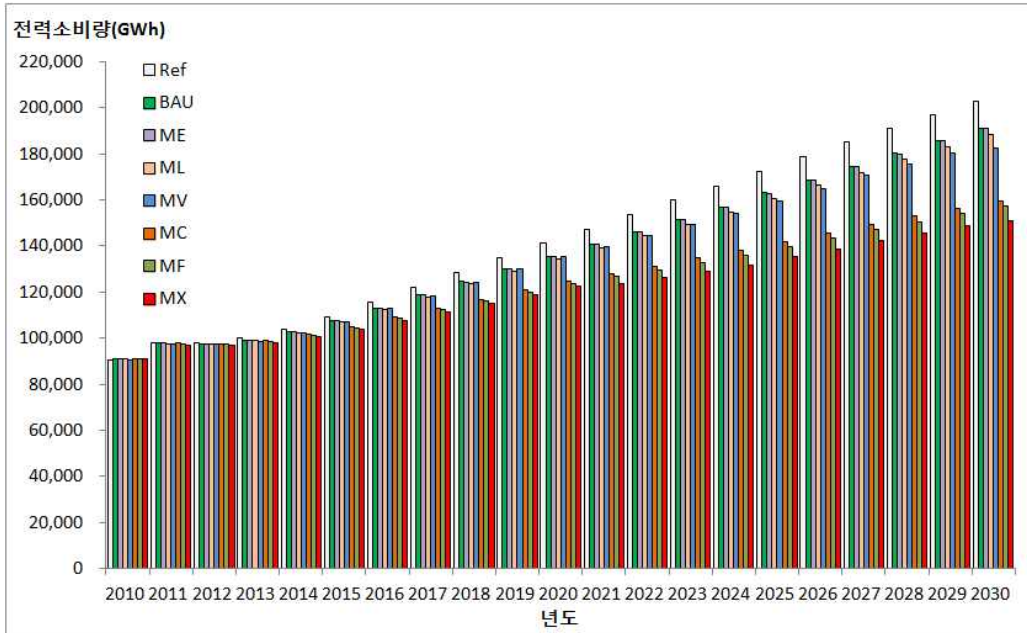


<그림 30> B계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력가격탄력성 0.66 적용)

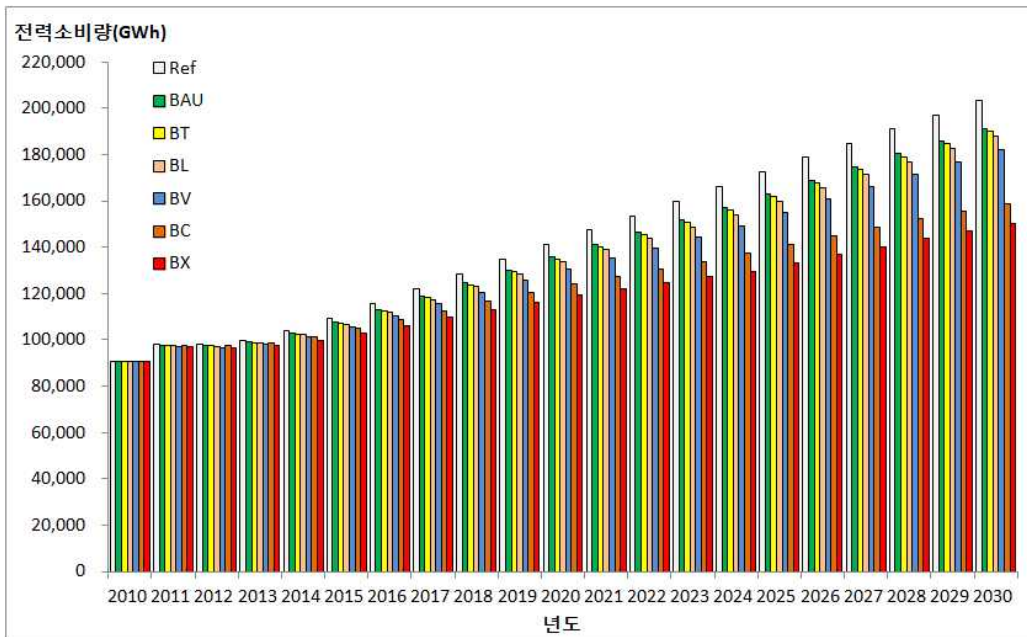
(2) 산업부문 전력 가격탄력성 0.460 적용 시



<그림 31> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.460 적용)

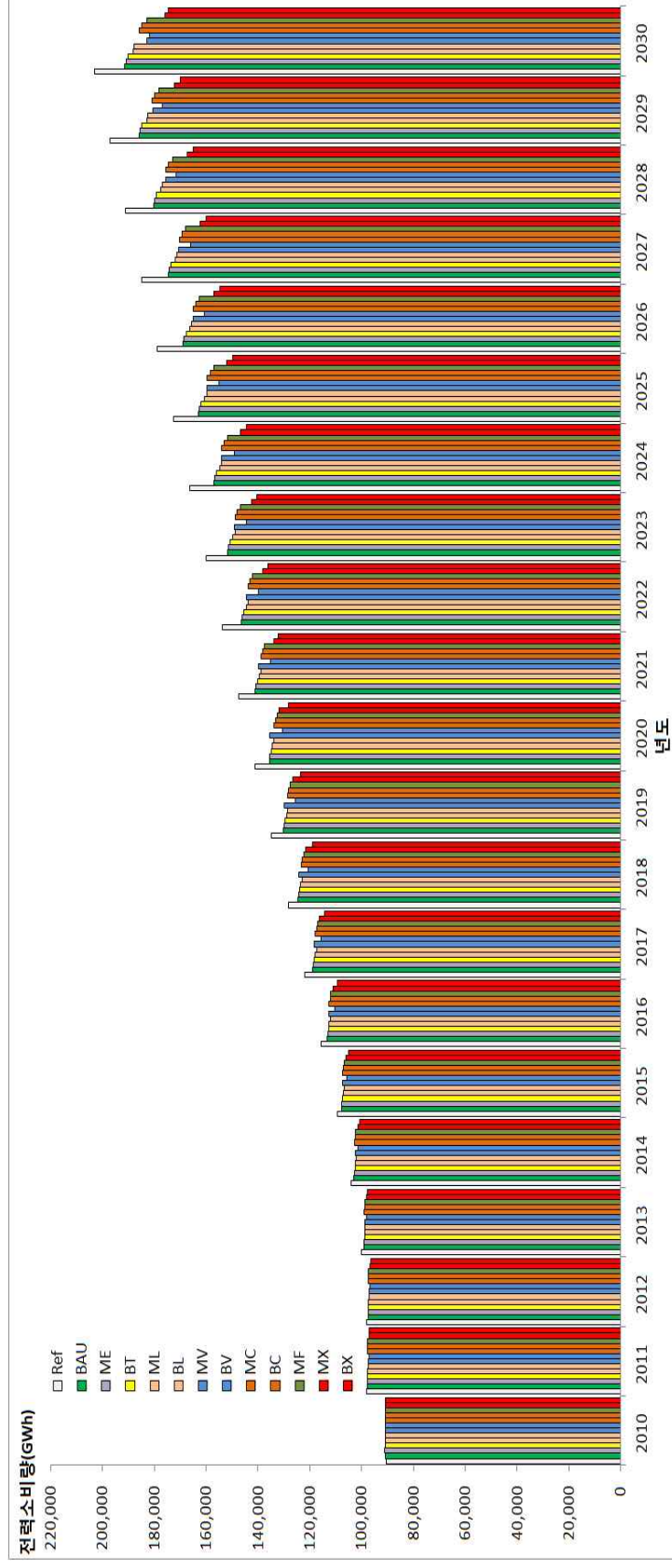


<그림 32> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력 가격탄력성 0.460 적용)

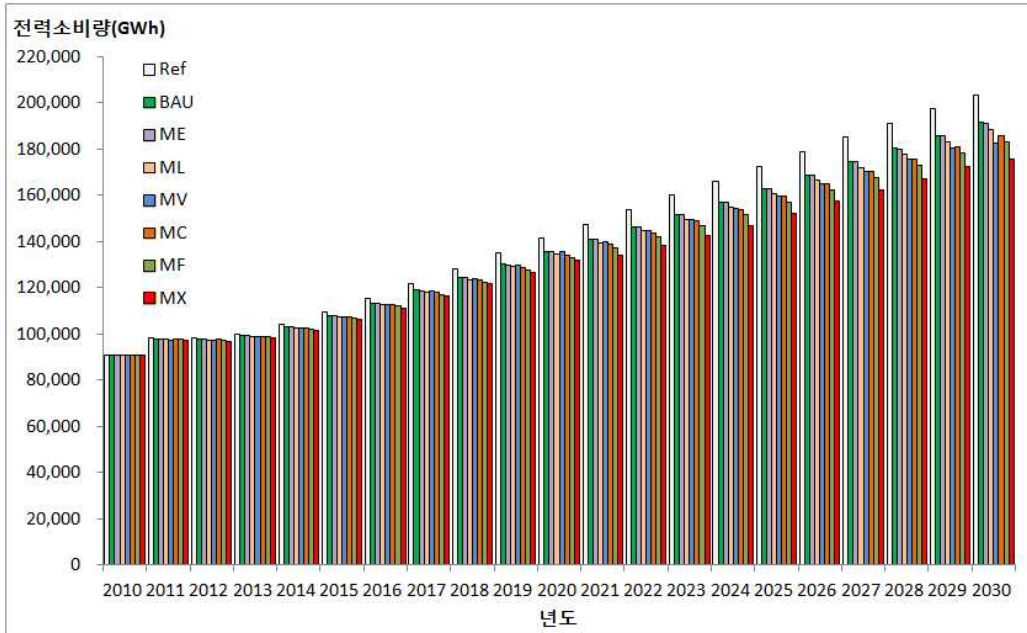


<그림 33> B열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력 가격탄력성 0.460 적용)

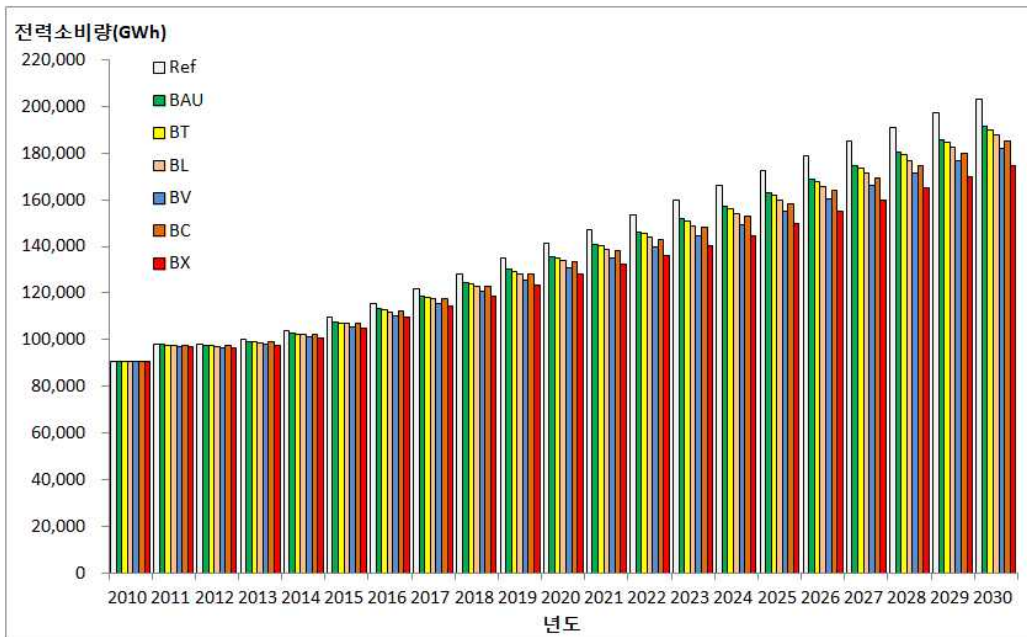
(3) 산업부문 전력 가격탄력성 0.045 적용 시



<그림 34> 시나리오별 제조업 전동기 전력사용량 전망 (전력 가격탄력성 0.045 적용)



<그림 35> M계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력 가격탄력성 0.045 적용)



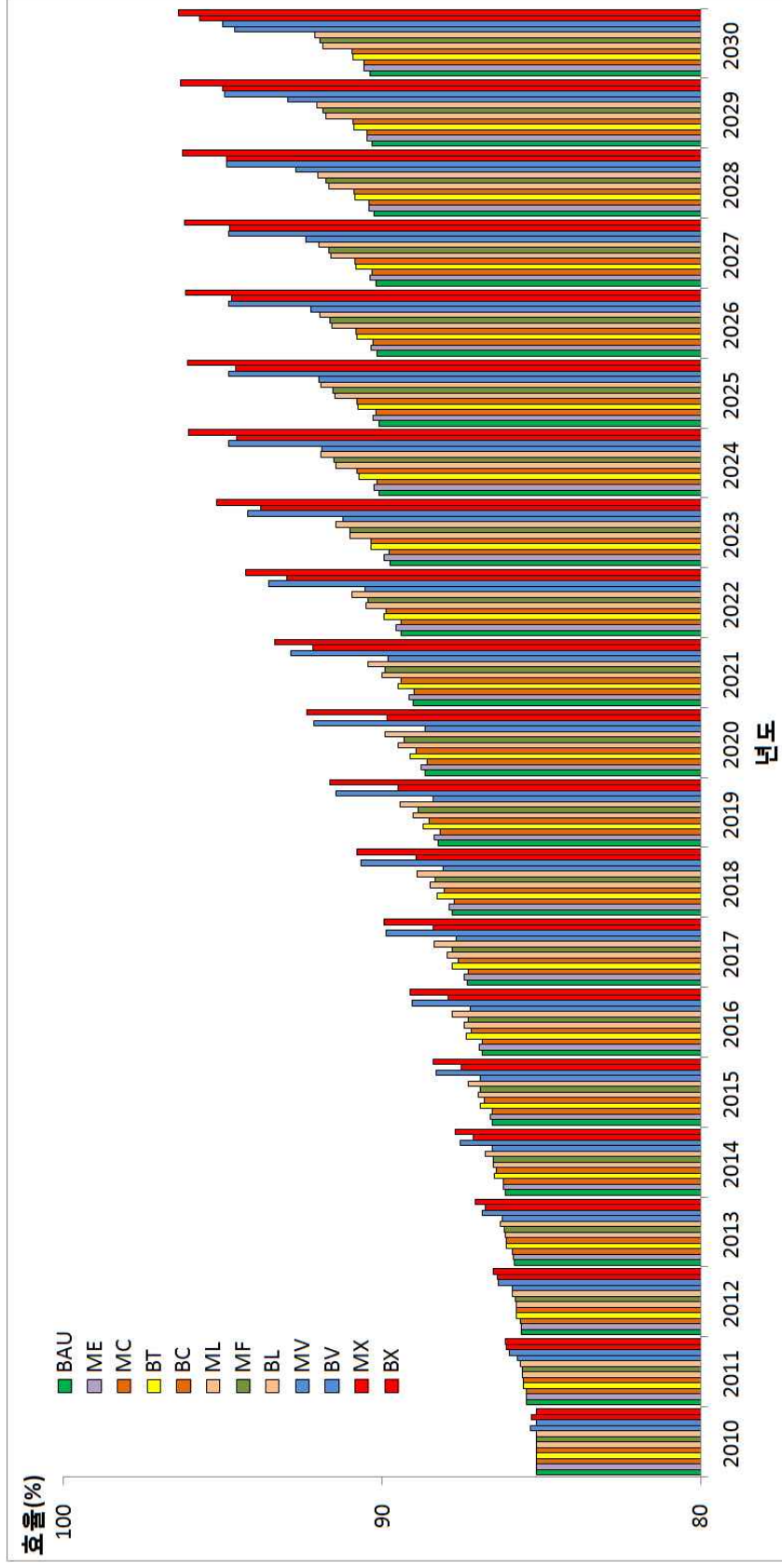
<그림 36> B계열 시나리오의 제조업 전동기 전력사용량 전망
(전력 가격탄력성 0.045 적용)

최저소비효율제도를 기반으로 한 M계열 시나리오의 경우, 최저소비효율제도 이외에 최저소비효율제도 적용기준 확대(ME)나 전기요금 인상(ME), 부하율 향상(ML), 인버터 설치(MV)를 추가적으로 적용시키면 전력사용량을 더 줄일 수 있다. 전기요금 인상의 경우, 적용하는 전력 가격탄력성에 따라 결과의 차이를 보이지만, 이 논문에서 이용한 0.66이나 0.460을 적용했을 때는 전력사용 절감 폭이 상당히 컸다. 반면, 최저소비효율제 확대 적용은 상대적으로 전력 절감 효과가 그리 크지 않았다. BAT를 도입하는 B계열 시나리오는 BAU 시나리오에 비해 전력 사용이 좀 더 줄긴 하지만 큰 차이를 보이지는 않는데, 이는 최저소비효율제도 하에서 선택되는 전동기 종류의 양상이 BAT 도입에서 선택되는 양상과 비슷하기 때문이다. 실제 75~150kW를 제외한 모든 용량에서 I국내 IE3 전동기의 평균 효율이 IMSSA로부터 뽑은 BAT보다 높았기 때문에 본 분석에서의 BAT는 대부분 국내 IE3 전동기였고, 이것은 비용효과성도 높아서 BAU 시나리오에서 많이 채택되었다. 그 외 전기요금 인상이나 부하율 향상, 인버터 설치가 병행되었을 때도 B계열 시나리오에서 추가적인 전력 감축을 이룰 수 있다.

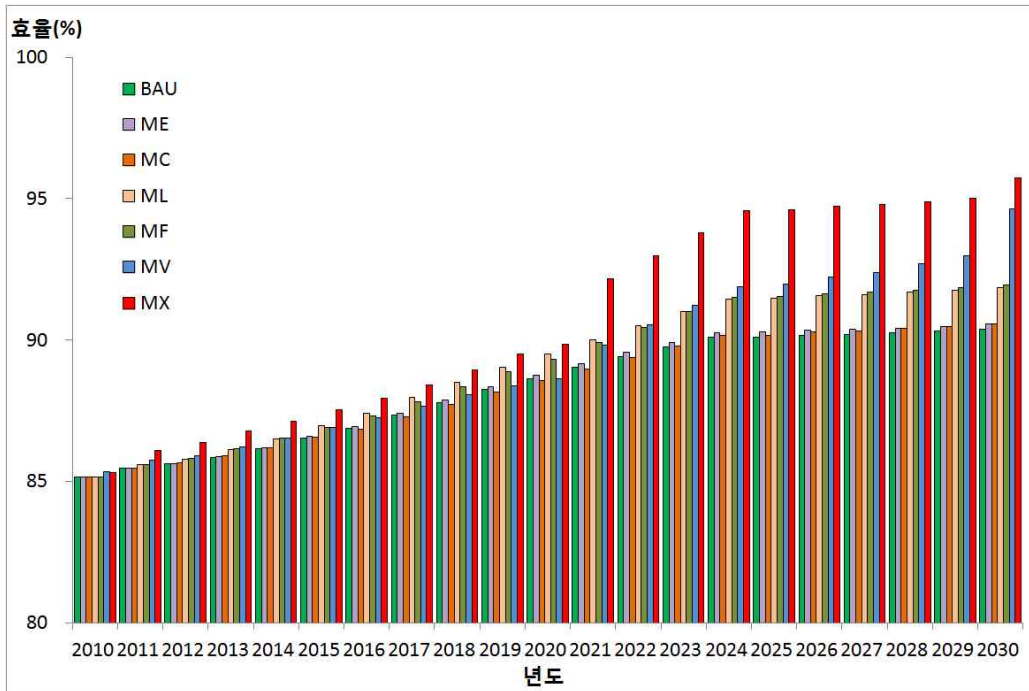
2) 시나리오별 전동기 평균 효율

다음 <그림 37>, <그림 38>, <그림 39>는 시나리오별로 우리나라 제조업 전동기 평균 효율수준을 나타낸 것이다.⁷⁷⁾ 여기서 평균 효율이란 모든 전동기들의 입력 전력량 합계 대비 유효 전력량 합계의 비율을 의미한다.

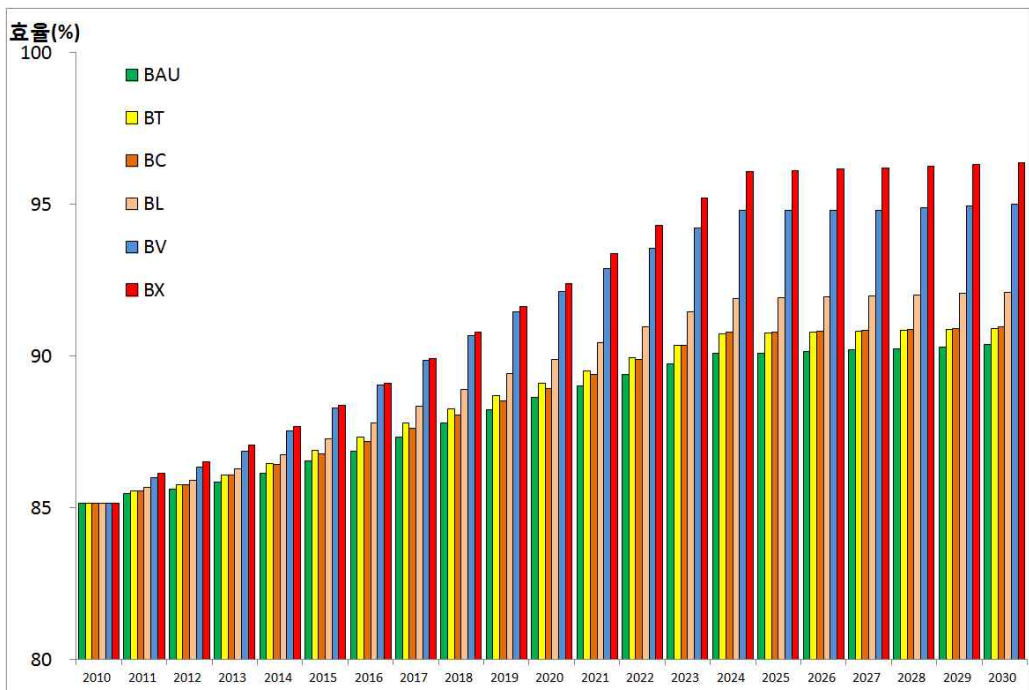
77) 전력의 가격탄력성은 MESSAGE 모형에서 선택되는 전동기 종류에 영향을 주지 않기 때문에 가격탄력성에 관계없이 평균 효율은 동일하다.



<그림 37> 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율 전망



<그림 38> M계열 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율



<그림 39> B계열 시나리오별 제조업 전동기 평균 효율

먼저 BAU 시나리오에서는 최저소비효율제도 시행에 따라 전체적인 전동기 효율 수준이 점차 증가하여 2030년에는 평균 90% 수준에 이를 것으로 전망된다. 증가폭이 2024년을 기점으로 완화되는 것은 그 때가 최저효율제도 시행 전에 보급된 낮은 효율의 전동기 수명이 끝나고 높은 효율의 신기술로 교체가 거의 완료되는 시점이기 때문이다. MC 시나리오와 ME 시나리오에서는 BAU에 비해 효율이 약간 증가하는데, MC의 경우 전기요금 인상에 따라 고효율 전동기의 경쟁력이 증가해 채택되는 비율이 약간 증가하며, ME의 경우 최저소비효율제 확대에 따라 고용량 전동기의 효율이 좀 더 증가하기 때문이다. ML 시나리오에서는 신규 전동기 구입 시 과대용량선택(oversize)을 하지 않도록 함으로써 부하율이 향상되어 전동기 이용 효율이 증가하고, MV 시나리오에서는 신기술 도입 가능 시점인 2020년부터 신기술에 인버터 설치함으로써 전동기 효율이 증가하게 된다. MX 시나리오에서는 여러 방안들을 모두 적용함으로써 효율이 96.4%까지 증가한다. 한편 B계열 시나리오도 비슷한 양상으로 효율이 나타난다.

3) 시나리오별 전력소비 감축량 및 비용

다음 <표 26>은 시나리오별로 2010~2030년까지의 누적 전기사용량과 누적 비용을 나타낸 것이다. 비용에는 초기투자비·연간 운영유지비, 전기비용이 포함되었는데, 연간 운영유지비는 초기투자비의 10% 수준이며(에너지관리공단, 2004), 전기 비용은 전기요금 인상(MC) 시나리오에서의 전기요금 전망치를 이용하였다.⁷⁸⁾ 표에서 보듯이, 전동기 전체 비용에서 전기 비용이 차지하는 비율은 모든 시나리오에서 94~97% 수준으로 상당히 높다. 전동기는 수명이 15년 내외로 짧지 않은데다 대체로 장시간 가동되는 설비이기 때문에 전기 사용이 많아 총 비용에서 전기 비용이 차지하는 비중은 매우 크기 때문이다.⁷⁹⁾ 그래서 비용을 줄이기 위해서는 무엇보다 전력 사용을 줄여 전기 비용

78) 사회적 관점에서 올바른 전기 비용이 얼마인가에 관해 다양한 견해가 있을 수 있는데, 이 논문에서는 전기 요금 인상(MC) 시나리오에서 이용한 전기 요금 전망치가 올바른 전기 비용에 가깝다고 가정하고 이를 이용하였다.

을 줄이는 것이 가장 중요하다. 또한 효율 개선을 통해 전동기의 소비전력을 줄일 수 있으면 그만큼 절감 편익도 크다.

79) 이는 간단한 계산으로 확인할 수 있다. 예들 들어, 37kW 전동기의 초기 투자비용과 연간 유지관리비용이 각각 50천원/kW, 5천원/kW/yr이고 전기요금이 70원/kWh, 부하율 60%, 가동률 50%라고 가정하면 전동기의 비용은 다음과 같다. (부하율은 전동기가 낼 수 있는 최고 출력 대비 실제 출력의 비율을 의미하고, 가동률은 전체 이용시간 중에서 전동기를 가동하는 비율을 의미한다)

초기투자비용 = 37kW × 50 천원/kW = 1,850 천원

연간 운영유지비용 = 37kW × 5 천원/kW/yr = 185 천원/yr

연간 전기비용 = 37kW × 24시간 × 365일 × 0.6 × 0.5 × 70원/kWh = 6,807천원

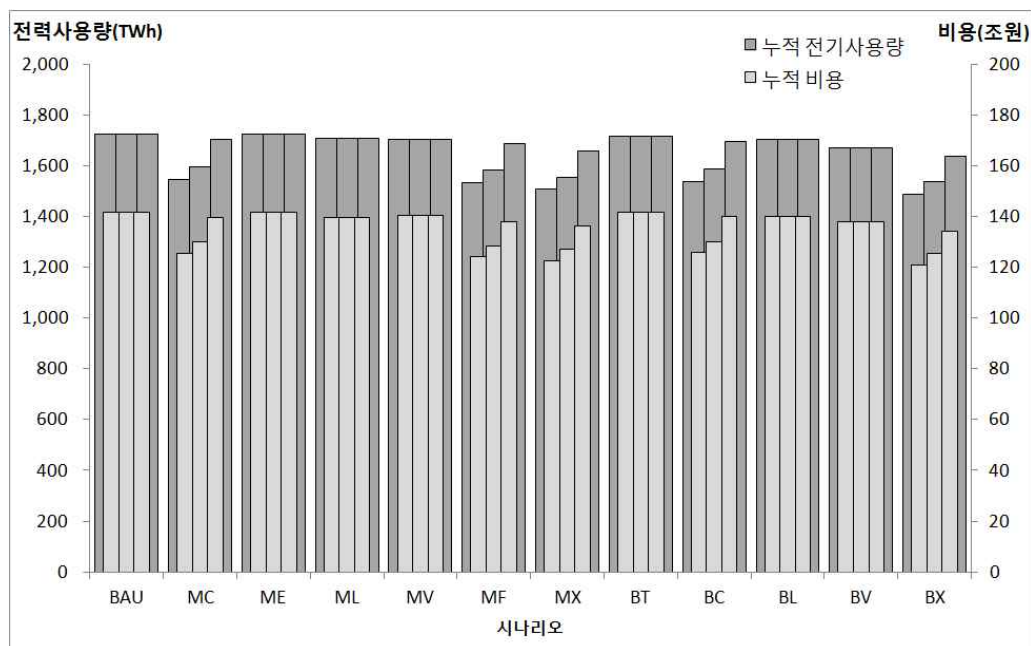
<표 26> 시나리오별 제조업 전동기의 2010-2030년 누적 전력사용량과 누적비용

시나리오		누적 전력사용량 (GWh)	누적 비용 (십억원)		
			전기 비용	그외 비용	합계
BAU		1,723,660	135,963	5,448	141,411
MC	MC ^a	1,543,516	120,937	4,576	125,513
	MC ^b	1,594,130	125,156	4,850	130,007
	MC ^c	1,701,854	134,144	5,443	139,587
ME		1,721,694	135,800	5,676	141,475
ML		1,707,753	134,651	5,031	139,682
MV		1,703,555	134,287	6,118	140,405
MF	MF ^a	1,530,947	119,901	4,198	124,099
	MF ^b	1,580,855	124,063	4,446	128,508
	MF ^c	1,687,066	132,924	4,982	137,906
MX	MX ^a	1,505,662	117,816	4,732	122,547
	MX ^b	1,554,265	121,867	5,014	126,881
	MX ^c	1,657,669	130,490	5,623	136,113
BT		1,715,194	135,274	6,309	141,583
BC	BC ^a	1,537,580	120,454	5,183	125,636
	BC ^b	1,587,925	124,651	5,505	130,157
	BC ^c	1,695,072	133,591	6,204	139,795
BL		1,701,688	134,161	5,601	139,762
BV		1,668,103	131,402	6,265	137,667
BX	BX ^a	1,487,918	116,377	4,622	120,998
	BX ^b	1,535,484	120,343	4,905	125,247
	BX ^c	1,636,714	128,788	5,517	134,305

주: 1. 전력사용량과 비용 모두 2010년 시점으로 할인하여 누적인 값임.

2. MC, MF, MX, BC, BX 시나리오의 a는 전력 가격탄력성 0.66, b는 전력 가격탄력성 0.460, c는 전력 가격탄력성 0.045를 적용한 경우임.

위 표에서 누적 전기사용량과 누적 비용을 그래프로 나타내면 다음 <그림 41>과 같다. 그림에서 보면 적용하는 산업용 전력 가격탄력성에 따라 다소 차이가 있긴 하지만, 전력가격 인상이 포함될 경우(MC, MF, MX, BC, BX) 전력사용량이 눈에 띄게 감소한다. 그리고 그에 비례해 비용도 감소하는데 이는 전동기 비용에서 전기 비용의 비중이 매우 크기 때문이다.



주: 각 시나리오별 3개의 막대그래프는 각각 전력 가격탄력성 0.66, 0.460, 0.045를 적용한 경우임.

<그림 40> 시나리오별 제조업 전동기 2010-2030년 누적 전력사용량 및 누적비용

한편, BAU 시나리오에서 다른 시나리오로의 변화를 모색할 경우, 시나리오별 전력 감축량과 비용 변화, 단위절감비용을 비교하여 살펴볼 필요가 있다. 앞의 <표 26>을 바탕으로 시나리오 간 전력사용량 증감과 소요 비용 증감, 단위전력절감비용을 계산하면 다음 <표 27>과 같다.

<표 27> 시나리오별 BAU 대비 전력사용량·비용 증감 및 단위절감비용

시나리오		전력사용량 증감 (GWh)	비용 증감 (십억원)	단위절감비용 (원/kWh)
MC	MC ^a	-180,144 (10.5%)	-15,899	-88.3
	MC ^b	-129,530 (7.5%)	-11,405	-88.0
	MC ^c	-21,806 (1.3%)	-1,824	-83.7
ME		-1,966 (0.1%)	64	32.7
ML		-15,907 (0.9%)	-1,729	-108.7
MV		-20,105 (1.2%)	-1,006	-50.1
MF	MF ^a	-192,713 (11.2%)	-17,312	-89.8
	MF ^b	-142,805 (8.3%)	-12,903	-90.4
	MF ^c	-36,594 (2.1%)	-3,505	-95.8
MX	MX ^a	-217,998 (12.6%)	-18,864	-86.5
	MX ^b	-169,395 (9.8%)	-14,530	-85.8
	MX ^c	-65,991 (3.8%)	-5,298	-80.3
BT		-8,466 (0.5%)	172	20.4
BC	BC ^a	-186,080 (10.8%)	-15,775	-84.8
	BC ^b	-135,735 (7.9%)	-11,254	-82.9
	BC ^c	-28,588 (1.7%)	-1,616	-56.5
BL		-21,972 (1.3%)	-1,649	-75.0
BV		-55,557 (3.2%)	-3,744	-67.4
BX	BX ^a	-235,742 (13.7%)	-20,413	-86.6
	BX ^b	-188,176 (10.9%)	-16,164	-85.9
	BX ^c	-86,947 (5.0%)	-7,106	-81.7

주: 1. 전력사용량과 비용은 2010~2030년간의 값을 2010년 시점으로 할인하여 누적한 값임.

2. a는 전력 가격탄력성 0.66, b는 전력 가격탄력성 0.460, c는 전력 가격탄력성 0.045를 적용한 경우임.

3. 전력사용량 증감에서 괄호 안의 값은 BAU 대비 비율을 나타낸 것임.

위 표에서 전력 가격탄력성 0.460을 적용한 것을 중심으로 설명하면 다음과 같다. M계열 시나리오 중에서 전기요금 인상(MC) 시나리오는 2030년까지 129,530 GWh의 전력을 줄일 수 있어 단일 감축방안으로는 가장 감축효과가 컸고, 그에 따라 비용도 가장 크게 줄일 수 있다. 이는 BAU 대비 7.5%를 감축하는 것으로 2010년 우리나라 제조업 전동기 총 전력사용량(90,540 GWh)의 1.43배 혹은 설비용량 679 MWe 월성 1호기 원자력발전소(2012년 발전량 4,287,645 MWh)⁸⁰⁾가 설계수명 30년 동안 생산하는 총 전력량보다 많은 양이다. 인버터 설치(MV)나 부하율 향상(ML), 최저소비효율제 확대(ME) 시나리오는 MC 시나리오에 비해 전력수요 감축량이 많이 적고, ME 시나리오는 전력감축량이 가장 적었다. ME 시나리오의 감축량이 가장 적은 것은 현재 고효율 전동기에 대해 최저소비효율제도가 시행되지 않고 있어서 고효율 기술개발이 충분히 이뤄지지 않은 상황이기 때문에 추가적인 감축가능성이 현재로서는 그리 크지 않아서이다. 전기요금 인상, 최저소비효율제 확대, 부하율 개선, 인버터 설치까지를 다 포함한 MX 시나리오에서는 2030년까지 전력 소비를 169,395 GWh까지 절감할 수 있는데, 이는 BAU 대비 9.8%를 감축하는 것으로 2010년 우리나라 제조업 전동기 총 전력사용량(90,540 GWh)의 1.87배 혹은 설비용량 700 MWe 월성 3호기 원자력발전소(2012년 발전량 5,655,168 MWh)⁸¹⁾가 설계수명 30년 동안 생산하는 총 전력량과 비슷한 양이다.

BAT를 도입하는 시나리오(BT)는 BAU에 비해 추가적인 전력 감축 효과가 별로 크지 않는데, 이는 BAT가 효율이 높으면서도 비용효과적일 때가 많아 BAU 시나리오와 비슷한 전동기 기술 선택이 일어나기 때문이다. BAT 이외에 전기요금인상, 부하율 향상, 인버터 설치까지 하게 되면 최대 188,176 GWh까지 전력사용을 줄일 수 있고, 이는 BAU 대비 10.9%를 감축하는 것으로 이는 2010년 우리나라 제조업 전동기 총 전력사용량(90,540 GWh)의 2.08배 혹은 설비용량 700 MWe인 월성 4호기 원자력발전소(2012년 발전량 6,316,592 MWh)⁸²⁾가 설계수명 30년 동안 생산하는 총 전력량보다 조금 적은 양이다. 이 값은 이 논문에서의 제조업 전동기 최대 기술적 전력 감축잠재량으로 볼

80) 한국원자력산업회의 <http://www.kaif.or.kr>

81) 한국원자력산업회의 <http://www.kaif.or.kr>

82) 한국원자력산업회의 <http://www.kaif.or.kr>

수 있다.

단위절감비용 측면에서는 ML 시나리오가 -108.7원/kWh로 가장 편익이 큰 대안으로 나왔고, ME, BT 시나리오를 제외한 나머지 시나리오들도 모두 단위절감비용이 (-)값으로 나왔다.⁸³⁾ ML 시나리오의 경우, 부하율 향상으로 인해 별도의 비용 없이 전동기 효율 개선이 이루어지고 아울러 고효율 전동기의 균등화 비용도 낮아지게 함으로써⁸⁴⁾ 이것이 채택되는 비율이 높아져 전력 절감효과가 더 커지게 된다. ME 시나리오 이외 다른 시나리오들도 전체 비용에서 전기요금 비중이 꽤 크기 때문에 전력 소비 절감이 바로 비용 절감으로 이어져 비용 변화가 (-)가 된다. 한편, ME 시나리오는 전력감축량이 가장 적을 뿐만 아니라 단위절감비용도 가장 비싼 대안(32.7원/kWh)으로 나왔다. 이는 현재 대용량 전동기에 대해 최저소비효율제도가 시행되고 있지 않아서 고효율 기술개발이 충분히 이뤄지지 않은 상황이기 때문에 전력 절감 잠재량이 크지 않아서이다. 그러나 ME 시나리오에서의 단위절감비용(32.7원/kWh)은 2010~2030년 사이 최저 산업용 실질 전기요금(66.0원/kWh)보다 싸기 때문에 최저소비효율제도 확대 방안도 편익이 더 크다고 볼 수 있다. 향후 최저소비효율제도 확대 시행에 따른 기술개발을 통해 대용량 전동기의 효율 개선이 이루어진다면 보다 전력소비 감축 잠재성이 커질 것이다. 한편, BT 시나리오는 전력절감비용이 20.4원/kWh으로 두 번째로 비싼 편이며, 전기요금 인상, 부하율 향상, 인버터 설치까지 포함했을 경우, -85.9원/kWh가 된다.

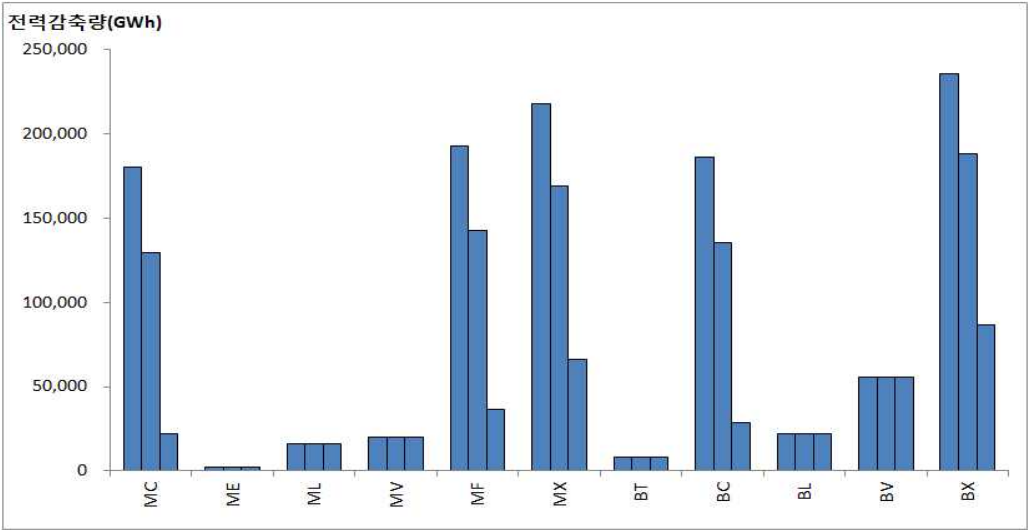
전기요금 인상이 포함된 시나리오에서 전력 가격탄력성을 0.66이나 0.045로 적용했을 경우에도 단일방안으로 전기요금 인상이 제일 감축효과가 컸고(전력 가격탄력성 0.66 적용 시 180,144 GWh, 탄력성 0.045 적용 시 21,806 GWh), 모든 방안을 다 적용했을 때는 65,991 GWh(전력 가격탄력성 0.045) ~ 217,998 GWh(전력 가격탄력성 0.66 적용)까지 감축 가능한 것으로 나왔다. 단위절감비용은 약간의 차이가 있긴 하지만, 83.7(전력 가격탄력성 0.045) ~ 88.3(전력 가격탄력성 0.66 적용)로 비슷한 수준으로 나왔다. BX 시나리오는

83) Mckinsey&Company(2009) 등의 연구에서도 산업부문 효율개선이 온실가스 감축에서 (-)의 비용을 가진다고 조사된 바 있다.

84) 기술의 균등화 비용은 부하율이 증가할수록 감소한다. 그리고 고효율 전동기가 채택될 경우 초기투자비나 운영유지비가 증가할 수 있으나, 전체 비용에서 전기요금 절감의 효과가 훨씬 더 크기 때문에 결과적으로 비용이 줄어든다.

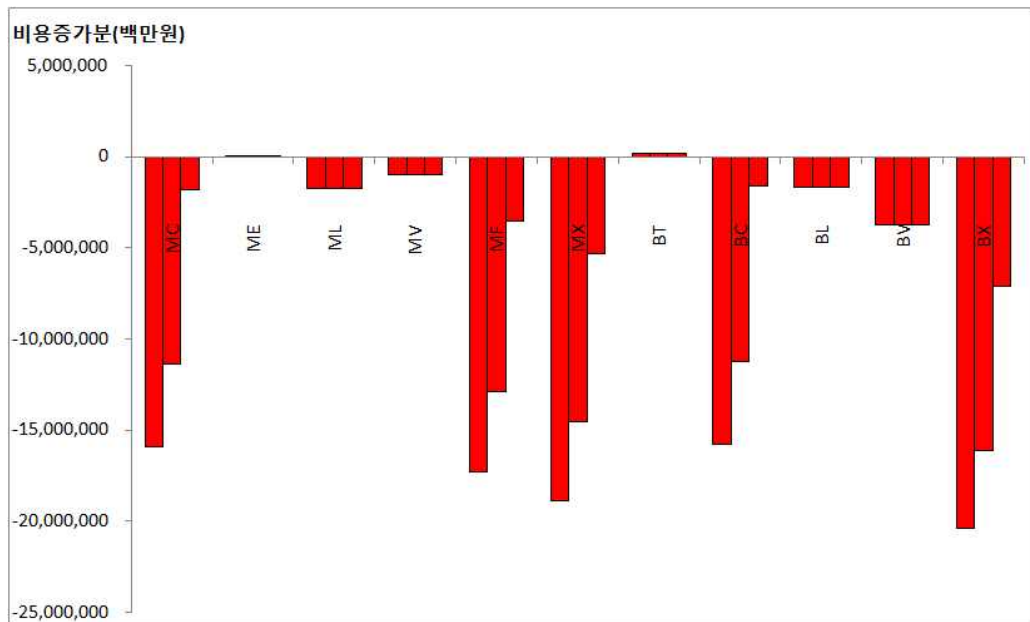
전력감축량이 86,947 GWh(전력 가격탄력성 0.045)~235,742 GWh(전력 가격 탄력성 0.66)로 가장 큰 감축효과를 보였다.

전력 가격탄력성에 따라 시나리오별 전력감축량과 비용증가분, 단위절감비용을 그래프로 나타내면 각각 <그림 41>, <그림 42>, <그림 43>과 같다.



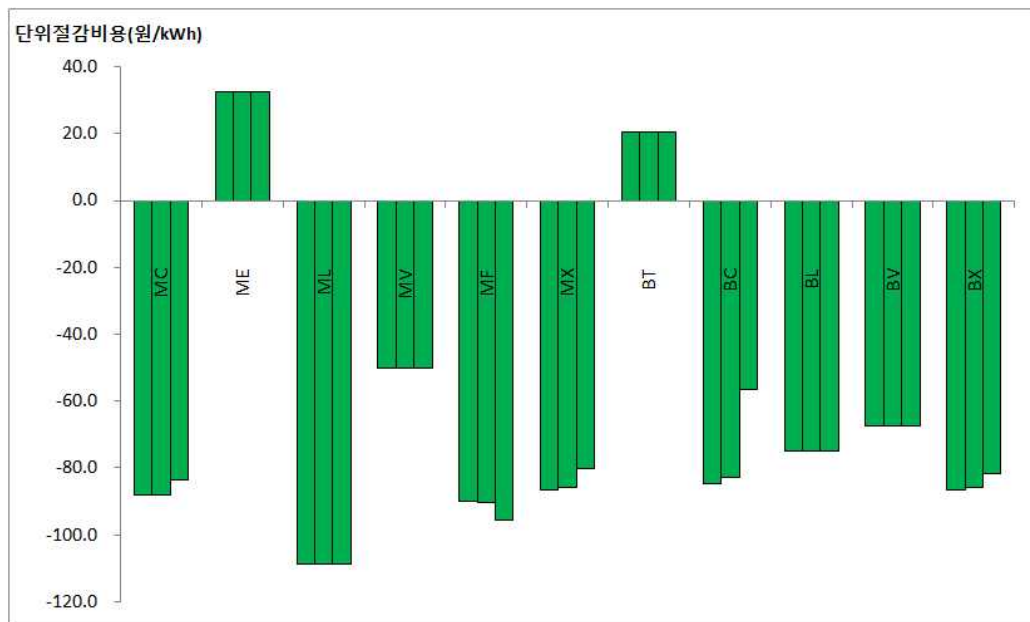
주. 각 시나리오에서 왼쪽부터 전력 가격탄력성 -0.66, 0.460, 0.045 순임.

<그림 41> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 전력감축량



주. 각 시나리오에서 왼쪽부터 전력 가격탄력성 -0.66, 0.460, 0.045 순임.

<그림 42> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 비용증가분



주. 각 시나리오에서 왼쪽부터 전력 가격탄력성 -0.66, 0.460, 0.045 순임.

<그림 43> BAU 대비 시나리오별 제조업 전동기 단위절감비용

2. 신기술 전동기의 초기투자비 회수 기간 분석

이 논문에서 다룬 용량별 신기술 및 고효율 전동기들의 초기구입가격 증가분에 대한 회수기간을 분석한 결과는 다음 <표 28>과 같다. 표에서 보듯이, 현재 시중에 나와 있는 IE2 전동기는 대체로 회수기간이 3년 이하이고 IE3 전동기는 2~4년이어서 경제성이 양호하다고 볼 수 있다. 해외 BAT의 경우, 용량별 차이는 있으나 4~6년이 많고 10년 이상인 것들도 있다. 신기술 전동기인 초고효율 전동기, Switched Reluctance Motor, 영구자석 적용 동기 전동기, Brushless Direct Current Motor의⁸⁵⁾ 투자액 증가분 회수기간은 용량별로 편차가 큰데, 3년 미만인 것들도 있고, 일부는 20년 이상 되는 것들도 있다.

85) 이들 신기술 전동기들은 미래 개발될 가상의 전동기이고 전문가 판단에 의한 기술 및 비용 값을 적용하였으므로 수치의 불확실성이 클 수 있다.

<표 28> 고효율 전동기의 초기구입비용 증가분 회수기간

(단위: 년)

	삼상유도 (단위: kW)						
	~7.5	7.5~15	15~37	37~75	75~150	150~370	370~
초고효율 전동기	4.1	2.0	3.1	4.5	11.7	15.0	12.6
Switched Reluctance Motor	1.9	9.0	15.3	12.7	21.8	18.6	20.9
영구자석 적용 동기 전동기	8.7	2.8	3.4	4.9	7.0	9.0	7.6
Brushless Direct Current Motor	3.2	1.6	11.7	16.9	22.2	28.5	23.9
IE2	0.8	2.5	3.2	1.6	3.4	1.4	-
IE3	2.5	3.2	4.2	2.4	4.2	2.2	-
BAT	4.2	3.9	6.6	5.0	10.8	5.8	17.9

주: 회수기간은 기존 전동기 대비 초기구입비용 차이를 연간 전력 절감량으로 나눠서 산정하였음.

VI. 결론

1. 요약 및 결론

이 논문에서는 우리나라 제조업부문 전동기를 대상으로 현재 시행되고 있는 최저소비효율제도 이외에 여러 추가적인 대안을 통해 감축할 수 있는 전력 소비량이 어느 정도인지를 시나리오 분석을 통해 추정하고 비교하였다. 전동기는 제조업뿐만 아니라 모든 부문에서 공통적으로 사용되고 있으며 장시간 가동되는 설비로서 우리나라 제조업 전력 사용량의 42.9%, 우리나라 전체 전력 수요의 20.9%를 차지하는 중요한 공통 기술이다(2010년 기준). 그래서 전력 수요관리 차원에서 전동기를 효율적으로 이용하는 것은 매우 중요하다.

전동기에 대한 최저소비효율제도는 우리나라에서 2008년부터 적용되기 시작하였는데, 향후 전동기의 효율적 이용에 많은 기여를 할 것으로 전망된다. 그러나 미국이나 EU와 달리 우리나라는 200kW 이하 삼상유도 전동기에만 최저소비효율제도를 적용하고 있어서 200kW 이상의 대용량 전동기의 효율적 이용은 담보하기 어렵다. 그리고 우리나라 산업용 전기요금이 다른 선진국에 비해 낮고 화석연료보다도 낮은 현상도 나타나고 있는 상황에서 전기 요금 인상을 통해 전동기 동력서비스에 대한 수요 자체를 줄이거나 고효율기기로의 전환을 유도함으로써 전력 수요를 줄일 필요가 있다. 혹은 불필요하게 과대용량의 전동기를 사용하지 않도록 함으로써 부하율 저하와 효율 저하를 줄일 필요도 있다. 아울러 인버터 설치를 통해 전동기가 사용하는 전력 소비를 추가적으로 줄일 수도 있다.

이 논문에서는 전력 수요관리 차원에서 제조업 전동기를 대상으로 최저소비효율제도 이외에 전기요금 인상, 최저소비효율제도 확대, 전동기 부하율 향상, 인버터 설치를 각각 시나리오를 설정하고 그에 대한 전력 감축 잠재량과 경제성을 분석하였다. 분석 결과, 전기요금 인상 시나리오가 2030년까지 129,530 GWh(BAU 대비 7.5%)의 전력을 절감하여 단일방안으로는 가장 효과가 큰 대안으로 나왔으며, 모든 감축수단을 다 적용했을 경우는 2030년까지

169,395 GWh(BAU 대비 9.8%)의 전력을 줄일 수 있는 것으로 나왔다(전력 가격탄력성 0.460 적용). 전력 가격탄력성 0.66이나 0.045를 적용했을 경우에도 단일방안으로 전기요금 인상이 제일 감축효과가 커서 21,806~180,144(BAU 대비 1.3~10.5%) GWh의 전력을 절감할 수 있고, 모든 방안을 다 도입했을 경우에는 65,991~217,998(BAU 대비 3.8~12.6%) GWh까지 절감할 수 있다. 반면 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율제도 확대는 절감효과가 가장 작았다.

단위절감비용에서는 부하율 향상 시나리오의 편익이 -108.7원/kWh으로 가장 컸고, 전기요금 인상 시나리오의 경우도 -83.7~-88.3원/kWh 수준으로 편익이 크게 나왔다. 비용이 (-)으로 나온 것은 전동기에서 전기 비용이 전체 비용에서 차지하는 비중이 높아 전력 절감이 바로 비용 절감으로 이어지기 때문이다. 200kW 이상 전동기에 대한 최저소비효율제도 확대는 단위절감비용이 가장 비싼 대안(32.7원/kWh)으로 나왔는데, 대용량 전동기에 대해 아직 최저소비효율제도가 시행되고 있지 않아서 고효율 기술개발이 충분히 이뤄지지 않았기 때문이다. 그럼에도 이는 앞으로의 산업용 전기요금보다는 싸기 때문에 실행으로 인한 편익이 더 크다. 그 외 시나리오에서도 대부분 단위절감비용이 (-) 비용으로 나왔으며, 전기요금 인상이나 인버터 설치, 부하율 개선, 최저소비효율제 확대와 같은 방안 모두 편익이 더 크다는 것을 의미한다.

그리고 현재 우리나라에서 고효율 전동기로 나와 있는 IE2 전동기와 IE3 전동기들은 기존 기술 전동기 대비 초기구입비용 증액분 회수기간이 IE2는 3년 이하, IE3는 2~4년이며, 해외 BAT의 4~18년과 비교해서도 우수한 편이다.

2. 연구의 의의와 정책적 함의

현재 전력수급 불안정이 점차 심각해지는 상황에서 우리나라 전체 전력 소비의 20.9%를 차지하고 있는 제조업부문 전동기에 대한 수요관리는 매우 중요하다. 이 논문은 우리나라 제조업 전동기의 전력수요 감축잠재량을 파악하고 감축 대안들의 비용효과성을 분석했다는 점에서 의미가 있다. 이 논문에서 감축방안으로 고려한 전기요금 인상이나 최저소비효율제 확대, 전동기 부하율 향상, 인버터 설치 등 전동기 전력 수요를 줄이는데 있어 중요한 이슈로서 이들의 전력 감축잠재량이나 경제성을 전체적으로 비교분석했다는 점에서 이 논문은 의미가 있다. 이를 통해 앞으로 우리나라 제조업 부문 전동기의 전력 수요관리를 해 감에 있어 정책 수립이나 보완에 유익한 방향을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

또한 이 논문에서는 국제 전동기 시장에서 거래되고 있는 25,000여개의 전동기 정보가 담긴 IMSSA 패키지를 바탕으로 국내에 구축되어 있는 에너지관리공단(2009) DB와 비교 가능하게 용량별 평균 효율 및 평균 비용을 도출하였다. 그리고 현재 에너지관리공단에 고효율기기로 등록되어 있는 IE2, IE3 전동기의 효율 정보와 유통물가를 바탕으로 용량별 평균 효율 및 평균 비용을 도출하였다. 이는 아직 국내 전동기 관련 DB가 상세하게 구축되어 있지 못한 현실에서 우리나라 및 해외 고효율 전동기 정보를 파악하고 비교분석하는데 작은 도움이 될 것으로 본다.

이 논문의 분석을 통해 도출할 수 있는 정책적 시사점은 다음과 같다.

첫째, 산업용 전기요금 인상은 다른 어떤 대안보다 전력 감축잠재량이 크고 그에 따른 전력 비용 절감도 크기 때문에 전력 수요관리를 위해서는 전기요금 인상이 무엇보다 필요하다. 그동안 우리나라는 산업용 전기요금의 저가 정책을 유지하면서 여러 전력 수요관리 정책을 같이 진행했으나 효과를 거두지 못했다. 이 논문의 결과에서 보듯이, 전기 요금 인상은 가장 전력 감축 효과가 크고 비용효과적이기 때문에 실질적인 전기 요금 인상 없이 전력 수요관리를 한다는 것은 실효성이 없다. 향후 원가 회수는 물론이고 송배전 비용과 여러 환경 비용 등을 반영하여 요금을 현실화해 갈 필요가 있다. 현재 시행중인 계

시별요금제도(Time of Use; TOU)나 최근 논의되고 있는 최대피크요금제(Critical Peak Pricing; CPP) 같은 실시간 요금제에서도 전기요금 인상이 뒷받침될 때 제대로 된 수요관리 효과를 나타낼 것이다.

둘째, 전동기의 전력 수요관리는 시행으로 인한 편익이 크기 때문에 이에 대한 적극적인 홍보와 투자가 이루어져야 한다. 전동기는 수명이 15년 내외이고 장시간 가동되는 설비이기 때문에 전력 사용이 비용에서 차지하는 비중이 매우 크다. 그래서 전동기에 대한 전력절감 투자는 상당한 비용 절감으로 이어지고, 논문의 결과에서처럼 여러 감축방안들은 대부분 편익이 훨씬 더 크다. 고효율 전동기나 고효율 인버터 개발 및 설치 등에 대한 투자가 적극 이뤄져야 한다. 그동안 예산 부족 등의 이유로 지원 폭의 편차가 컸던 고효율 인버터 지원 정책도 일관성 있게 확대해 가야 한다. 아울러 전동기 사용자들이 에너지효율패러독스를 극복할 수 있도록 에너지효율 투자의 이득에 관해 적극 홍보해 갈 필요가 있다.

셋째, 전동기의 최저소비효율제도는 전동기 효율 향상을 통해 상당한 전력 수요를 줄일 수 있다는 점에서 바람직하며 지속적으로 시행해 갈 필요가 있다. 우리나라의 최저소비효율제도 기준은 미국이나 EU와 거의 대등한 수준이며, 국내에서 비용효과적인 고효율 전동기들이 많이 개발되도록 유도하였다. 미국, EU처럼 200kW 이상 전동기에 대해 최저소비효율제도를 확대하는 것은 아직 감축잠재량이 적고 상대적으로 비싼 대안이기 때문에 이를 수 있다. 그러나 산업용 전기요금에 비해 절감비용이 작다는 점에서 이미 경제성이 있고 기술개발을 통해 고효율 전동기가 개발되면 더욱 전력 감축잠재량이 커질 수 있다는 점에서 충분히 고려할 필요가 있다.

3. 연구의 한계 및 향후 개선방향

이 연구의 한계점과 개선방향은 다음과 같다.

첫째, 이 연구에서는 데이터의 한계로 인해 전동기를 종류별, 용량별로만 구분하여 분석하였다. 그러나 전동기는 종류, 용량 구분만이 아니라 용도별(고효율, 고속, 저속·고토크 등)에 따라 특성이 다르고, 제조업의 경우 업종별로도 이용하는 종류가 다르기 때문에 각 용도와 업종에 따라 전력소비 양상이나 감축잠재량이 다를 수 있다. 아직까지 국내에서는 용량별, 용도별, 업종별로 전동기 기술특성이나 보급현황에 관한 상세하고 정확한 DB가 구축되어 있지 않은데, 전력수요에서 전동기가 차지하는 중요성을 고려해 체계적 조사가 정기적으로 이루어질 필요가 있다. 그것을 바탕으로 현재의 전력 소비 양상과 실질적인 수요관리 정책 분석이 가능할 것이다.

둘째, 이 연구에서는 기준년도의 전동기 보급 용량 추정 시 상향식 접근을 통한 추정과 하향식 접근을 통한 추정을 모두 이용하였고, 통계적 일치를 위해 하향식 추정값을 기준으로 하여 상향식 접근에서의 보급 용량 추정치를 조정하였다. 이는 전동기 보급용량에 대한 최근 데이터 부재로 인해 과거 추세를 이용하여 추정한 보급용량이 전체 통계와 차이가 나서 생긴 문제이다. 향후 전동기 전력 사용량과 기술특성에 대한 정확하고 상세한 DB 구축이 필요한 부분이다.

셋째, 이 연구에서는 산업용 전력수요의 가격탄력성을 직접 추정하지 않고 선행 연구를 바탕으로 모형의 안정성과 값의 수위를 고려해 대표적인 값들을 차용하여 이용하였다. 그러나 향후에는 최근의 데이터를 반영하면서 안정되고 정확한 모형 구축을 통해 산업용 전력수요의 가격 탄력성을 분석하는 것이 필요하다.

참고문헌

[국내문헌]

- 강만옥·황 옥, 2010, “우리나라 전력부문의 환경유해보조금 개편 효과분석: 산업용 교차보조금 개편을 중심으로”, 환경정책연구, 제9권, 제1호, pp.57-81.
- 곽상경, 2006, 「계량경제학」, 제5판, 다산출판사.
- 국회예산정책처, 2011, 「2010 회계연도 공공기관 결산 평가」.
- 김기화, 1990, 「경기순환이론」, 다산출판사.
- 김수덕, 2009, “에너지가격 측면에서 살펴 본 산업용 도시가스 및 전력수요”, 한국지구시스템공학회지, 제46권, 제3호, pp.1-8.
- 김수이, 2007, “2단계 초월대수함수를 이용한 탄소세의 산업별 CO₂ 배출저감 효과분석”, 에너지경제연구, 제6권, 제1호, pp.79-117.
- 김승래, 2013, “에너지가격체계 왜곡의 파급효과”, 경제·인문사회연구회 정책현안 종합토론회 「합리적 에너지 가격체계 구축 - 진단과 개선」 자료집.
- 김승래·송호신·김지영, 2009, 「저탄소·환경친화적 산업을 위한 재정정책 방향」, 한국조세연구원.
- 김창섭, 2011, “전력 수급관리체계 개선방안”, 「지속가능한 에너지정책 및 전력수급 관리방안」 정책토론회 자료집.
- 김현석, 2006, 에너지시스템 모형에서의 학습효과 적용과 온실가스 감축 시나리오 분석, 건국대학교 산업공학과 석사학위 논문.
- 나인강·류지철, 2000, 「에너지수요 분석 및 전망에너지수요 분석 및 전망 - 2001년 수요전망과 정책이슈」, 에너지경제연구원.
- 나인강·서정환, 1998, 「전력다소비업종의 전력수요 행태 분석」, 에너지경제연구원.
- 나인강·서정환, 2000, “산업용 전력수요의 탄력성 분석”, 자원·환경경제연구, 제9권, 제2호, pp.333-347.
- 남준우·이한식, 2010, 「계량경제학 - 이론과 EViews/Excel 활용」, 제3판,

- 홍문사.
- 녹색성장위원회, 2012, 「에너지수요관리 혁신 및 정책 거버넌스 개선방안 연구」.
- 녹색전력연구회, 2003, 「한국의 전력정책 대안을 말한다: 2015 녹색전력정책」.
- 대통령자문지속가능발전위원회, 2007, 「에너지가격체계 적정화 방안연구」.
- 문춘걸, 2001, “국내 전력산업의 생산성 측정과 생산성변화의 분석”, 경제연구, 제22권, 제1호, pp.169-203.
- 박광수, 2005, 「환경규제에 따른 산업부문의 에너지원 간 대체관계 및 온실가스 배출저감 효과 분석」, 에너지경제연구원.
- 박광수, 2011, 에너지가격체계 현안 및 개선방향, 에너지경제연구 10주년 기념 포럼 발표자료.
- 박광수, 2013, 에너지가격체계 왜곡의 파급효과, 경제·인문사회연구회 정책현안 종합토론회 ‘합리적 에너지 가격체계 구축 - 진단과 개선’ 자료집.
- 박범조, 2007, 「계량경제학」, 시그마프레스.
- 박수익, 2007, “국내 에너지수요관리 정책과 시사점”, 한국에너지기술연구원 KIER 기술정책포커스.
- 박순달, 1992, 「선형계획법」, 민영사, 제3판.
- 박영구, 2006, 온실가스 감축잠재량 분석을 위한 기술평가모형 개선에 관한 연구, 아주대학교 에너지학과 박사학위논문.
- 박종배, 2011, 상시 수요반응시장과 스마트그리드, 2011 스마트그리드 시장 및 기술 세미나 발표자료.
- 박창수, 2003, 「산업부문내의 에너지 대체 효과분석」, 에너지경제연구원.
- 산업연구원, 2012, 「고령화를 고려한 중장기 산업구조 전망」.
- 산업자원부, 1998, 「DSM 잠재량 평가와 모니터링을 위한 기법개발 및 활용 방안 연구에 관한 최종보고서」.
- 산업자원부, 2000, 「1999년도 에너지총조사 보고서」.
- 산업자원부, 2002, 「제1차 전력수급기본계획(2002~2015년)」.
- 산업자원부, 2003, 「2002년도 에너지총조사 보고서」.
- 산업자원부, 2004, 「제2차 전력수급기본계획(2004~2017년)」.

- 산업자원부, 2005, 「전기요금 수준 및 용도별 요금의 적정성 연구」.
- 산업자원부, 2006a, 「2005년도 에너지총조사 보고서」.
- 산업자원부, 2006b, 「제3차 전력수급기본계획(2006~2020년)」.
- 산업자원부, 2008, 「장기 전력수요 예측의 적정성 검증방안에 관한 연구」.
- 상공자원부, 1993, 「1993년도 에너지총조사 보고서」.
- 석광훈, 2012, 전력 수요관리 및 요금체제의 현황과 개선방안, 국회기후변화포럼 부설 기후변화정책연구소 정책보고서 ‘이명박정부 기후변화정책 평가 및 차기정부 정책과제’.
- 안지운, 2011, 「기술경제분석을 통한 미래에너지시스템 구축전망 - 기술·경제 통합에너지 전망 모형 구축」, 에너지경제연구원.
- 양준모, 2010, “전력수요관리효과 추정에 관한 연구”, 응용경제, 제12권, 제3호, pp.131-154
- 양준모·유상희, 2008, “전력수요관리를 감안한 합리적 전력수요예측”, 한국자료분석학회지. 제10권, 제5(B)호, pp.2755-2765.
- 에너지경제연구원, 1996a, 「에너지절약 시책 평가 모델 개발 연구」.
- 에너지경제연구원, 1996b, 「에너지효율등급 표시제도의 에너지절약 잠재량 추정 방법」.
- 에너지경제연구원, 2006, 「에너지정책변천사: 에너지경제연구원 20주년 (1986-2006)」.
- 에너지관리공단, 2004, 「에너지기술DB 구축사업」.
- 에너지관리공단, 2009, 「공통설비 중심의 온실가스 기술 DB 조사사업 - 산업, 가정, 상업 부문」.
- 에너지대안포럼, 2012, 2030년 에너지 대안.
- 온실가스종합정보센터, 2011a, 「2020 저탄소 사회 구축을 위한 로드맵 - 단계별·부문별 온실가스 감축목표 수립」.
- 온실가스종합정보센터, 2011b, 「MESSAGE 모형을 이용한 부문별 온실가스 감축잠재량분석」.
- 윤복래, 2009, 인버터 동향 및 보급확대방안, 월간 계장기술 2009년 7월호.
- 윤순진, 2002, “지속가능한 발전과 21세기 에너지정책”. 한국행정학보. 제36권 제3호, pp.147-166.

- 윤순진, 2003, “기후변화 대응전략으로서의 원자력발전정책에 대한 비판적 검토: 지속가능한 발전의 관점에서”, 한국행정학보, 제37권, 4호, pp.359-382.
- 윤순진, 2004, 전력정책의 쟁점과 사회적 합의, ‘우리나라 전력정책의 미래에 대한 합의회의’ 준비 워크숍 자료.
- 윤순진, 2013, 에너지 위기의 시대, 어떻게 극복할 것인가, ‘에너지 위기의 시대, 어떻게 극복할 것인가 - 국내외 사례에서 극복방안을 모색한다’ 토론회 자료집.
- 이상훈, 2011, 현행 전기요금 체계의 문제점과 개선방향, ‘지속가능하고 공평한 전기요금 개편방안 - 첫번째 토론, 용도별 요금의 형평성’ 전기요금 연속 토론회 자료집.
- 이성근, 2003, 「산업부문의 고효율유도전동기 보급실태조사 및 활성화 방안 연구(시장보급률 전망 및 활성화 방안을 중심으로)」, 에너지경제연구원.
- 이성인 · 최도영, 2010, 「저소비 고효율 경제사회 구축을 위한 국가 에너지효율화 추진전략 연구」, 에너지경제연구원.
- 이수진 · 윤순진, 2011, “재생가능에너지 의무할당제도의 이론과 실제: RPS 도입국가들에 대한 분석을 바탕으로”, 환경정책, 제19권, 제3호, pp.79-111.
- 이윤경, 2008, “국가별 전기요금 비교 및 시사점 도출”, 대한전기학회 전력경제연구회 2008년 춘계학술대회 자료집.
- 이종수 · 허은녕, 1998, “국내 전력수요의 장 · 단기 탄력성 추정”, 한국자원공학회지, 제35권, pp.149-156.
- 이준구, 2003, 「미시경제학」, 제4판. 법문사.
- 이학노 · 한진현 · 이명훈, 2010, “전력피크의 추정 및 예측에 대한 연구”, 에너지경제연구, 제9권 제2호. pp.83-99.
- 장병기, 2011, “주가 및 부동산가격이 화폐수요에 미치는 부의 효과: 국가 간 비교 분석”, 국제지역연구, 제15권, 제1호, pp.219-240.
- 장현준, 2001, “에너지부문의 여건변화와 새로운 에너지정책 방향”, 한국에너지공학회 2001년도 춘계학술발표회 논문집.
- 정용훈 · 이유수, 2011, 에너지효율최적화를 위한 이론과 정책에 대한 논의. 에너지경제연구원 에너지포커스.
- 정태용, 1998, 「전력수요 예측기법 연구」, 에너지경제연구원.

- 정한경, 2011a, 겨울철 전기 수요 급증 현황과 원인, ‘겨울철 전력소비 급증, 원인과 해결방안 - 지속가능한 전력정책과 요금제도 토론회’ 자료집.
- 정한경, 2011b, 전기요금 정책 및 체제 개선 방향, ‘지속가능하고 공평한 전기요금 개편방안’ 1차 토론회 자료집.
- 정한경, 2012, 에너지 효율적인 전기요금 제도, ‘바람직한 전기요금 체계 어떻게 마련할 것인가?’ 전기요금 긴급토론회자료집.
- 정한경 · 박광수, 2010, 「시장친화형 에너지 가격체계 구축 종합연구」, 에너지경제연구원.
- 정한경 · 박광수 · 최도영 · 김수일 · 박용덕 · 김수일, 2007, 「에너지가격 정책 및 규제제거 개선 연구」, 에너지경제연구원.
- 조영탁, 2011, 전기요금문제와 지속가능하고 공평한 요금제도, ‘지속가능하고 공평한 전기요금 개편방안’ 1차 토론회 자료집.
- 조영탁, 2012, 에너지의 전력화, 어떻게 대응할 것인가?, 석유협회지, 286호, pp.19-22.
- 주택산업연구원, 2004, 「주택경기예측모형 연구1」.
- 지식경제부, 2008a, 「전동력 응용기기 보급 · 이용실태조사」.
- 지식경제부, 2008b, 「제4차 전력수급기본계획(2008-2022년)」.
- 지식경제부, 2009, 「2008년도 에너지총조사 보고서」.
- 지식경제부, 2010a, 「산업체 다소비 업종의 전력소비 실태조사」.
- 지식경제부, 2010b, 「제5차 전력수급기본계획(2010-2024년)」.
- 지식경제부, 2011, 「에너지수요전망에 따른 그린에너지기술 효과분석 연구」.
- 지식경제부, 2012a, 「전력수요관리백서」.
- 지식경제부, 2012b, 「2011년도 에너지총조사 보고서」.
- 지식경제부, 2012c, 「효율관리기자재 운용규정」.
- 지식경제부, 2013, 「제6차 전력수급기본계획(2013-2027년)」.
- 지식경제부 · 에너지경제연구원, 2013, 「2012 에너지통계연보」.
- 진상현, 2008, “생태근대화론에 기반한 한국의 에너지정책에 대한 연구”, 환경정책, 제16권, 제3호. pp.57-86.
- 차경수 · 김수일 · 박광수, 2008, 「에너지 수급 분석 및 전망 기반구축(2차년

도)」.

최범선 · 김은환 · 정래혁 · 김홍희, 2009. “MESSAGE 모형을 활용한 전력산업분야 기후변화 대응방안 모색”, 2009년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집.

통상산업부, 1996, 「1996년도 에너지총조사 보고서」.

통상산업부, 1997, 「고효율유도전동기의 보급방안연구에 관한 최종보고서」.

한국에너지기술평가원, 2011, 「온실가스감축기술 전략로드맵 2011- 에너지 효율향상기술 중심의 기후변화 대응 R&D 이정표」.

한국전력공사, 2011, 「고객의 전기사용 최적화를 위한 수요관리프로그램 안내」.

허가형, 2013, 「제6차전력수급기본계획의 문제점 및 개선과제」, 국회예산정책처.

환경관리공단, 2004, 「환경기초시설 에너지절감방안」.

[외국문헌]

Anderson, Soren T. and Richard G. Newell, 2004. “Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits”. Resource and Energy Economics, vol.26, no.1, pp.27-50.

Backlunda, Sandra, Patrik Thollander, Jenny Palm and Mikael Ottosson, 2012, Extending the energy efficiency gap, Energy Policy, vol.51, pp.392-396.

Barnes, Malcom, 2003, 「Practical variable speed drives and power electronics」.

Beggs, Clive, 2009, Energy Efficient Electrical Services, Mangement, Supply and Conservation, 「Energy: Management, Supply and conservation」, 2nd ed, pp.288-314.

Brook Crompton, 2010, 「Guide to EU MEPS and Using harzardous Area

- Motors with Inverters(VSDs)」 .
- Considine, Timothy J., 1989, “Estimating the Demand for Energy and Natural Resource Inputs: Trade-offs in Global Properties”, *Applied Economics*, vol.21, pp.931-945.
- Consortium for Energy Efficiency(CEE), 2011, 「Motor Efficiency, Selection, and Management – A Guidebook for Industrial Efficiency Programs」 .
- DeCanio, Stephen J., 1998, “The efficiency paradox: bureaucratic and organizational barriers to profitable energy-saving investments”, *Energy Policy*, vol.26, no.5, pp.441-454.
- Department of Energy(DOE), 2002, 「the United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment」 .
- Department of Energy(DOE), 2008, 「Improving Motor and Drive System Performance – A sourcebook for Industry」 .
- Engle, Robert F. and Clive W. J. Granger, 1987, “Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing”, *Econometrica*, vol.55, no.2. pp.251-276.
- EPRI, 1993, 「Principles and Practice of Demand-side Management」 .
- ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY(EOLBNL), 2012, 「Estimate of technical potential for minimum efficiency performance standards in 13 major world economies」 .
- ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY(EOLBNL), 2013, 「The Future of Utility Customer-Funded Energy Efficiency Programs in the United States: Projected Spending and Savings to 2025」 .
- Gouveia, João Pedro, Patrícia Fortes and Júlia Seixas, 2012, “Projections of energy services demand for residential buildings: Insights from a bottom-up methodology”, *Energy*, vol.47, no.1, pp.430-442.
- Groot, Henri L.F. de, Erik T. Verhoef and Peter Nijkamp, 2001, “Energy

- saving by firms: decision-making, barriers and policies”, *Energy Economics*, vol.23, no.6, pp.717-740.
- Grubb, Michael, Jonathan Kohler and Dennis Anderson, 2002, “Induced technical change in energy and environmental modelling: analytic approaches and policy implications”, *Annual Review of Energy and the Environment*, vol.27, pp.271 - 308.
- Haas, Reinhard, Nebojsa Nakicenovic, Amela Ajanovic, Thomas Faber, Lukas Kranzl, Andreas Muller and Gustav Resch, 2008, “Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies”, *Energy Policy*, vol.36, no.11, pp.4012-4021.
- Hainoun, A., M. Seif Aldin and S. Almoustafa, 2010. “Formulating an optimal long-term energy supply strategy for Syria using MESSAGE model”, *Energy Policy*, vol.38, no.4, pp.1701-1714.
- Hassett, Kevin A. and Gilbert E. Metcalf, 1993. “Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly?”, *Energy Policy*, vol.21, no.6, pp.710-716.
- Hassett, Kevin A. and Gilbert E. Metcalf, 1995. “Energy tax credits and residential conservation investment: evidence from panel data”. *Journal of Public Economics*, vol.57, no.2, pp.201-217.
- Howells, Mark, Kiho Jeong, Lucille Langlois, Man Ki Lee, Kee-Yung Nam and Hans Holger Rogner, 2010, “Incorporating macroeconomic feedback into an energy systems model using an IO approach: Evaluating the rebound effect in the Korean electricity system”, *Energy Policy*, vol.38, no.6, pp.2700 - 2728.
- International Atomic Energy Agency(IAEA), 2007, 「MESSAGE User Manual」.
- International Energy Agency(IEA), 2011, 「Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems」.
- International Energy Agency(IEA), 2012, 「Electricity Information 2012

- with 2011 data」 .
- International Energy Agency(IEA), 2013, 「2013 Energy Prices and Taxes – Quarterly Statistics – Second quarter 2013」 .
- International Institute for Applied Systems Analysis(IIASA), 2003, 「Model runs with MESSAGE in the context of the further development of the Kyoto-Protocol」 .
- Jaffe, Adam B. and Robert N. Stavins, 1994, “The energy-efficiency gap what does it mean?”, *Energy Policy*, vol.22, no.10, pp.804-810.
- Johansen, Søren and Katarina Juselius, 1990, “Maximum Likelihood Estimation and Inference on Cointegration – with Application to the Demand for Money”, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, vol.52, no.2, pp.169-210.
- Jones, Clifton T., “A Pooled dynamic analysis of interfuel substitution in industrial energy demand by the G-7 Countries”, *Applied Economics*, vol.28, no.7, pp.815-821.
- Kaya, Y., 1989, Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris.
- KEMCO, 2007, Korea’s MEPS Plan for High Efficiency 3-Phase Induction Motors, Presentation document at Motor Summit 2007, Zurich.
- Kiani, Behdad, Peter Wild, Lawrence Pitt, Amy Sopinka and Tom F. Pedersen, 2013, “Optimal electricity system planning in a large hydro jurisdiction: Will British Columbia soon become a major importer of electricity?”, *Energy Policy*, vol.54, pp.311 - 319.
- Letschert, Virginie E., Nicholas Bojda, Jing Ke and Michael A. McNeil, 2012, 「Global Estimate of Cost-Effective Potential for Minimum Efficiency Performance Standards – Energy Savings, Environmental and Financial Impacts」 .
- Lovins, Amory B., 1976, 「Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace」 .

- Lovins, Amory B., 1990, The NEGAWATT REVOLUTION, the Conference Board Magazine 'ACROSS THE BOARD', vol.27, no.9, pp.21-22.
- Lu, Shyi-Min, Ching Lu, Kuo-Tung Tseng, Falin Chen and Chen-Liang Chen, 2013, "Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.21, pp.674-683.
- Masters, Gilbert M., 2004. 「Renewable and Efficient Electric Power Systems」.
- Matsuo, Yuji, 2012, Summary and Evaluation of Cost Calculation for Nuclear Power Generation by the Cost Estimation and Review Committee. The Institute of Energy Economics, Japan.
- McKane, Aimee and Ali Hasanbeigi, 2011, "Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems", Energy Policy, vol.39, no.10, pp.6595-6607.
- McKane, Aimee, John Mollet, Richard Aylwin, Paolo Bertoldi, John Cockburn and Chris Cockrill, 2005, IMSSA: Creating an International Standard for Motor Software, Energy Efficiency in Motor Driven Systems(EEMODS) 4th international Conference.
- McKinsey&Company, 2009, Pathways To Low Carbon Economy - version 2 of the global GHG abatement cost curve.
- Messner, S., A. Golodnikov and A. Gritsevskii, 1996, "A Stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III", Energy, vol.21, no.9, pp.775-784.
- Messner, Sabine and Manfred Strubegger, 1995. User's Guide for MESSAGE III.
- MIT. 2009. 「Update of the MIT 2003: Future of Nuclear Power」.
- Modi, Vijay, Susan McDade, Dominique Lallement and Jamal Saghir, 2005, 「Energy Services for the Millennium Development Goals」.
- Nakicenovic, Nebojsa, Joseph Alcamo, Gerald Davis, Bert de Vries, Joergen

- Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, Arnulf Gröbler, Tae Yong Jung, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Laurie Michaelis, Shunsuke Mori, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Lynn Price, Keywan Riahi, Alexander Roehrl, Hans-Holger Rogner, Alexei Sankovski, Michael Schlesinger, Priyadarshi Shukla, Steven Smith, Robert Swart, Sascha van Rooijen, Nadejda Victor and Zhou Dadi, 2000, 「Special Report on Emissions scenarios」, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Natural Resources Canada, 2003, Technical Fact Sheet – Premium-Efficiency Motors.
- OECD, 2012, 「OECD Economic Surveys: KOREA 2012」.
- Pachauri, Shonari and Daniel Spreng, 2004, “Energy use and energy access in relation to poverty”, *Economic and Political Weekly*, vol.39, no.3, pp. 17-23.
- Rao, Shilpa, Ilkka Keppo and Keywan Riahi, 2006, “Importance of Technological Change and Spillovers in Long-Term Climate Policy”, *The Energy Journal*, vol.27, pp.13-140.
- Reister, David B. and Warren D. Devine Jr., 1981, “Total costs of energy services”, *Energy*, vol.6, no.4 pp.305-315.
- Saidur, R., 2010. “A review on electrical motors energy use and energy savings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, no.3, pp.877-898.
- Selvakkumaran, Sujeetha and Bundit Limmeechokchai, 2013, “Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three Asian countries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.20, pp.491-503
- Soest, Daan P. Van and Erwin H. Bulte, 2000. “Does the energy-efficiency paradox exist? Technological progress and uncertainty”. *Environmental and Resource Economics*. vol.18, pp.101-112.

- Sola, A. V. H., Caroline Maria de Miranda Mota and João Luiz Kovaleski, 2011, "A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis". *Energy Policy*. vol.39, no.6, pp.3645-3654.
- Sovacool, Benjamin K., 2011, "Conceptualizing urban household energy use: Climbing the "Energy Services Ladder"", *Energy Policy*, vol.39, no.13, pp.1659-1668.
- Stock, James H. and Mark W. Watson, 1993. "A Simple Estimator of Cointegrating Vectors in Higher Order Integrated Systems", *Econometrica*, vol.61, pp.783-820.
- Sutherland, Ronald J., 1991, "Market barriers to energy efficiency investments", *Energy Journal*, vol.12, no.3, pp.15-34
- Sutherland, Ronald J., 1996, "The economics of energy conservation policy", *Energy Policy*, vol.24, pp.361-370.
- UNDP, 2000, 「World Energy Assessment : Energy and the challenge of sustainability」.
- United Nations Industrial Development Organization(UNIDO), 2010, 「Motor Systems Efficiency Supply Curves」.
- Wirl, Franz, 1995, "Impact of regulation on demand-side conservation programs", *Journal of Regulatory Economics*, vol.7, no.1, pp.43-62.

[인터넷 사이트]

Central Intelligence Agency 홈페이지 <https://www.cia.gov>

GNU Project 홈페이지 <http://www.gnu.org>

MotorMaster+ International 홈페이지

https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/software_motormaster_intl.html

국가에너지통계종합정보시스템(KESIS) <http://www.kesis.net>

미국 환경보호국 홈페이지 <http://www.epa.gov>

에너지관리공단 효율관리제도 홈페이지

http://bpms.kemco.or.kr/efficiency_system

유통물가 홈페이지 <http://www.isayprice.com/>

전력기반사업조성센터 홈페이지 <http://www.etep.or.kr/>

전력부하관리포털 홈페이지 <https://www.kdrm.or.kr>

전력통계정보시스템 홈페이지 <https://epsis.kpx.or.kr/>

한국원자력산업회의 <http://www.kaif.or.kr>

부록

1. 우리나라 고효율 전동기 효율 및 비용 자료

1) 고효율 전동기의 평균 효율

다음 자료는 에너지관리공단 홈페이지에 IE2 전동기 및 IE3 전동기로 등록된 전동기 및 유통물가 사이트에 있는 전동기를 대상으로 종류별, 용량별로 평균 효율과 비용을 조사하여 정리한 것이다.

<표 29> 우리나라 IE2 전동기의 평균 효율

(단위: %)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	84.9	82.8	82.8	76.6	80.8	83.4	82.0	76.7
1.5	-	85.0	86.1	-	85.7	85.3	87.2	83.6
2.2	-	-	87.2	-	86.8	88.2	88.0	85.3
3.7	87.0	88.7	-	-	88.3	88.5	88.2	86.1
5.5	88.3	90.2	-	-	89.2	90.1	90.2	87.5
7.5	89.9	90.7	-	-	90.1	90.3	90.4	88.9
11	90.2	92.6	90.8	-	90.6	91.5	91.2	90.2
15	91.5	92.4	91.7	-	90.8	91.8	91.4	91.5
18.5	91.5	91.9	92.4	-	91.5	93.1	92.5	91.1
22	91.5	93.5	92.8	-	91.8	92.9	92.6	91.9
30	92.9	93.7	93.5	-	92.7	93.7	93.2	91.8
37	92.8	93.8	93.7	-	93.2	93.8	93.3	93.1
45	94.3	94.8	94.0	-	93.4	94.1	93.9	92.8
55	95.6	94.3	94.1	-	93.8	94.6	94.1	93.8
75	94.2	94.5	94.8	-	94.2	94.9	94.3	93.9
90	94.5	95.1	94.6	-	94.8	94.9	95.0	94.8
110	95.0	95.4	94.8	-	95.1	95.4	95.3	94.6
132	94.8	96.0	95.3	-	95.3	95.6	95.6	94.7
160	95.4	95.8	-	-	95.5	95.7	95.4	94.8
200	94.9	96.3	95.7	-	95.8	95.6	95.3	94.9

주: 1. 에너지관리공단 홈페이지에 2008.07.01~2013.04.29까지 IE2 전동기로 등록된 2,872개의 전동기를 대상으로 조사함.

2. 전동기의 정격 출력이 규정된 값 사이에 있을 경우, 중간 또는 그 이상이면 위쪽의 높은 정격출력의 범위에 포함시켰고, 중간 미만이면 아래쪽의 낮은 정격출력 범위에 포함시킴.

3. 수치가 없는 것은 그 구간에 해당하는 전동기가 없는 것임.

<표 30> 우리나라 IE3 전동기의 평균 효율

(단위: %)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	-	-	-	-	83.5	86.6	84.6	-
1.5	-	-	-	-	86.5	87.6	89.4	-
2.2	-	-	-	-	87.6	90.8	90.2	-
3.7	-	-	-	-	89.3	90.0	89.7	-
5.5	-	-	-	-	90.7	92.1	91.7	-
7.5	-	-	-	-	91.4	91.9	91.0	-
11	-	-	-	-	92.4	93.5	92.8	-
15	-	-	-	-	92.7	93.2	91.7	90.6
18.5	-	-	-	-	93.2	93.9	93.1	-
22	-	-	-	-	92.9	94.2	93.0	-
30	-	-	-	-	92.8	95.1	94.6	-
37	-	-	-	-	93.8	95.1	95.2	-
45	93.6	-	-	-	94.9	95.4	94.7	-
55	-	-	-	-	95.2	96.1	94.8	-
75	93.7	95.5	-	-	94.6	96.3	95.9	-
90	-	-	-	-	95.3	95.7	96.3	-
110	-	-	-	-	96.0	95.8	96.7	-
132	-	-	-	-	-	-	-	95.1
160	-	-	-	-	95.9	96.3	96.4	-
200	95.0	-	-	-	-	-	96.1	-

- 주: 1. 에너지관리공단 홈페이지에 2012.04.10~2013.04.22까지 IE3(프리미엄) 전동기로 등록된 293개의 전동기를 대상으로 조사함.
2. 전동기의 정격 출력이 규정된 값 사이에 있을 경우, 중간 또는 그 이상이면 위쪽의 높은 정격출력의 범위에 포함시켰고, 중간 미만이면 아래쪽의 낮은 정격출력 범위에 포함시킴.
3. 수치가 없는 것은 그 구간에 해당하는 전동기가 없는 것임.

2) 전동기의 평균 비용

<표 31> 우리나라 IE2 전동기의 평균 비용

(단위: 원)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	-	234,917	289,333	-	333,583	293,583	374,250	671,167
1.5	-	110,000	168,000	209,333	138,000	128,667	171,333	302,000
2.2	98,636	99,545	141,818	167,727	114,545	110,000	161,364	240,000
3.7	67,027	67,027	102,432	132,432	84,865	77,297	105,405	191,892
5.5	66,182	67,027	102,432	132,432	84,865	77,297	105,405	191,892
7.5	57,733	63,600	89,733	107,867	72,000	69,733	94,000	155,067
11	54,818	58,455	80,000	97,909	69,000	64,273	92,636	142,000
15	48,933	54,067	74,133	93,733	66,333	63,467	90,800	135,467
18.5	52,919	60,432	92,378	91,568	69,784	69,297	114,108	131,892
22	53,136	58,909	78,636	87,682	70,045	66,773	100,682	126,227
30	58,667	57,333	76,867	88,700	76,433	74,500	92,200	128,000
37	56,703	54,838	72,486	87,081	73,946	68,946	87,865	125,703
45	61,444	68,822	86,400	88,267	88,667	84,533	114,556	125,978
55	65,709	70,636	90,018	96,582	94,855	90,473	107,855	129,364
75	67,373	67,787	77,373	84,707	108,880	92,373	118,600	125,640
90	84,011	62,989	73,489	86,378	121,300	86,967	114,789	124,744
110	80,618	60,355	71,536	83,291	116,464	87,127	103,300	120,327
132	79,652	59,667	71,553	-	115,061	86,189	103,341	-
160	76,000	56,975	68,881	-	109,788	82,306	99,500	-
200	92,245	69,020	-	-	119,120	89,345	-	-

주: 1. 유통물가 홈페이지에 2010년도 11월 기준 삼상유도 전동기 일반형으로 등록된 175개 전동기를 대상으로 조사함.

2. 전동기의 정격 출력이 규정된 값 사이에 있을 경우, 중간 또는 그 이상이면 위쪽의 높은 정격출력의 범위에 포함시켰고, 중간 미만이면 아래쪽의 낮은 정격출력 범위에 포함시킴.

3. 수치가 없는 것은 그 구간에 해당하는 전동기가 없는 것임.

<표 32> 우리나라 IE3 전동기의 평균 비용

(단위: 원)

kW	보호형				전폐형			
	2극	4극	6극	8극	2극	4극	6극	8극
0.75	-	-	-	-	435,500	380,833	482,750	875,083
1.5	-	-	-	-	179,333	165,333	219,333	392,667
2.2	-	-	-	-	150,909	141,818	211,364	311,364
3.7	-	-	-	-	110,000	99,730	136,757	249,459
5.5	-	-	-	-	110,000	99,730	136,757	249,459
7.5	-	-	-	-	94,267	90,800	122,133	201,600
11	-	-	-	-	86,545	83,727	120,273	184,545
15	-	-	-	-	86,067	82,600	118,333	176,133
18.5	-	-	-	-	90,703	90,324	148,432	171,514
22	-	-	-	-	91,091	86,864	130,955	164,182
30	-	-	-	-	95,667	93,167	110,633	166,467
37	-	-	-	-	92,378	86,270	105,486	163,432
45	70,378	82,578	112,333	-	101,600	101,533	137,489	151,156
55	74,491	91,800	107,982	-	107,545	108,527	129,364	155,218
75	86,373	81,360	100,587	-	124,787	110,853	142,347	150,800
90	96,200	81,889	95,544	-	138,889	99,589	131,456	143,467
110	92,327	75,445	92,982	-	133,391	99,782	118,336	138,382
132	91,235	68,341	82,280	-	131,788	98,720	118,379	-
160	87,056	68,363	78,894	-	125,750	94,275	113,969	-
200	106,075	79,370	-	-	136,400	102,295	-	-

주: 1. 유통물가 홈페이지에 2010년도 11월 기준 삼상유도 전동기 고효율로 등록된 103개 전동기를 대상으로 조사함.

2. 전동기의 정격 출력이 규정된 값 사이에 있을 경우, 중간 또는 그 이상이면 위쪽의 높은 정격출력의 범위에 포함시켰고, 중간 미만이면 아래쪽의 낮은 정격출력 범위에 포함시킴.

3. 수치가 없는 것은 그 구간에 해당하는 전동기가 없는 것임.

Abstract

Electricity Consumption Reduction Potential Analysis of High Efficiency Appliance by Demand Side Management in Korean Manufacturing Sector : focusing on Electric Motor

Joon Han

Department of Environmental Planning
The Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Because of the sudden increase in electricity demand, South Korea experienced a large-scale circular black-out in 2011. Electricity supply has become severely unstable as the electric power reserve rate has decreased to 3.8%. In order to satisfy the rapidly increasing electricity demand, South Korea has adopted and promoted SSM (Supply-Side Management)-oriented energy policy until now. But large-scale provision of nuclear and fossil energy, as well as renewable energy, has caused serious environmental damage and has had limitations in keeping electricity supply and demand in balance.

However, from the viewpoint of Energy Service, the important thing is to secure not the absolute needed quantity of energy but develop various ways to provide services looking at comprehensive energy solutions. If we can get services, we don't need to adhere to a particular type of energy and can be free from the obsession over energy quantity. We can, then,

find and create various alternatives which provide energy services. Among them, enhancement of efficiency is a prime example. Therefore, Energy Service is an important paradigm which helps us to overcome the limitations of SSM-oriented energy policy.

South Korea's manufacturing sector was responsible for 50.2% of the total national electricity demand in 2011 (ranking 5th among OECD countries). Electric motors consume 42.9% of the manufacturing sector electricity. It means that electric motors, which is representative of electricity-intensive equipment, consume 21.7% of total national electricity demand. Therefore, efficient use of electric motors is very important for national electricity demand-side management.

For efficiency enhancement of electric motors, South Korea has enforced Minimum Energy Performance Standards (MEPS) of electric motors since 2008. MEPS is the minimum basis of the energy efficiency of products; the government only allows manufacturers and retailers to produce and sell products which satisfy the criteria. Because MEPS of electric motors in South Korea is as strict as the EU and U.S.A., it is expected to contribute to the dissemination of highly efficient motors.

However, the Korean industrial electricity rate is the lowest among OECD countries and even has experienced a 'reversal phenomenon', which means electricity is cheaper than the fossil fuel such as diesel and natural gas. So electricity is preferred more than diesel or natural gas. Although the EU and U.S.A. enforce MEPS of electric motors in entire capacity, South Korea only covers products over 200kW and efficiency enhancement of high capacity electric motors is not guaranteed. In addition, oversizing is customary in electric motor selection and results in lower load factor and lower efficiency. Installation rate of VSD, which helps electricity savings of

electric motors, in South Korea is lower than the average of developed countries. In these situations, electricity consumption of electric motors is estimated to have additional reduction potential in South Korea's manufacturing sector.

This study sets up alternative scenarios alongside the BAU scenario (MEPS) and analyzes the electricity consumption reduction potential of electric motors in the Korean manufacturing sector and economic feasibility using the MESSAGE model which is a bottom-up optimization model for energy systems. Alternative scenarios include industrial electricity rate increase to the average level of OECD countries, MEPS expansion covering all capacity motors, load factor improvement and VSD installation rate improvement. In analyzing industrial electricity rate increase scenarios, this thesis considered three levels of price elasticity for electricity demand.

As a result, the electricity rate increase scenario has the highest electricity consumption reduction potential and it is estimated to be 7.5% below BAU by 2030. The maximum potential by adopting all the options is estimated to be 9.8% below BAU by 2030 (in this case, price elasticity of electricity demand is 0.460). On the other hand, MEPS expansion scenario has the lowest potential. In the case of unit reduction cost, load factor improvement scenario has -108.7KRW/kWh and electricity rate scenario has -83.7 to -88.3KRW/kWh. Negative reduction cost implies that electricity savings leads to cost savings, because electricity cost comprises most of the total cost. MEPS expansion scenario has 32.7KRW/kWh, an expensive option, but it is lower than industrial electricity rate projection, which means it has value as an alternative.

The following policy implications were found: First, industrial electricity rate increase is needed because it has not only the most electricity savings

potential but also the greatest cost saving effect. Second, active promotion and big investment for electricity savings of electric motors are needed because it is very beneficial. Third, MEPS of electric motors is very desirable because it leads to large electricity savings by efficiency enhancements.

Keywords

: Energy Service, Electric Motor, Demand Side Management, MESSAGE model, Efficiency, Minimum Energy Performance Standard(MEPS), Industrial Electricity Rate, Variable Frequency Drive(VSD), Load Factor, Best Available Technology(BAT)

Student Number : 2008 – 31075